



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ**

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

**HYDRAULICKÉ POSOUZENÍ STOKOVÉ SÍTĚ OBCE  
LIPŮVKA**

HYDRAULIC CALCULATION OF SEWAGE SYSTEM IN LIPŮVKA

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

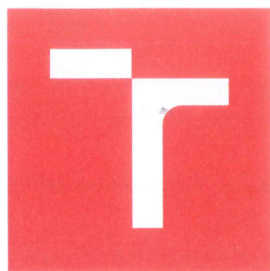
**Bc. Jan Balas**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. PETR HLUŠTÍK, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
PRACOVISTĚ	Ústav vodního hospodářství obcí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Jan Balas
NÁZEV	Hydraulické posouzení stokové sítě obce Lipůvka
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Petr Hlušík, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- [1] Pasportizační podklady pro vybranou oblast zdravotně-technické infrastruktury
- [2] LARRY W. MAYS. Stormwater collection systems design handbook. McGraw-Hill. 2001. ISBN 0-07-135471-9
- [3] Wastewater Technology Fact Sheet : Sewers, Pressure. In MEYERS, F.E. [online]. Niskayuna, NY : EPA U.S., 9/2002. <http://nepis.epa.gov/epa/832-pf-02-006>
- [4] STRÁNSKÝ, D., et al. Metodická příručka - Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí. In OPZP.cz [online]. 2009 [cit. 2012-11-25]. <http://opzp.cz>
- [5] ČSN EN 1671. Venkovní tlakové systémy stokových sítí. Český normalizační institut, Praha, 1998
- [6] ČSN EN 13508. Zjišťování a hodnocení stavu venkovních systémů stokových sítí a kanalizačních přípojek, Český normalizační institut, Praha, 2011 a 2013.
- [7] Související normy a legislativní podklady
- [8] Další podklady dle aktualizace vycházející z průběhu řešení dle pokynu vedoucího diplomové práce

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Student v rámci práce provede posouzení stokové sítě obce Lipůvka v softwarovém prostředí SWMM (Storm Water Management Model). Student v obci provede měrnou kampaň, výsledky použije pro kalibraci navrženého matematického modelu stokové sítě. Na základě výstupů dat (různých zátěžových stavů) z prostředí SWMM, doporučí nevyhovující kanalizační úseky k rekonstrukci s ohledem na jejich technický stav. Součástí práce bude i doporučení technického řešení k rekonstrukci stokové sítě, které bude finančně podloženo.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

**VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:**

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



.....  
**Ing. Petr Hlušík, Ph.D.**

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá hydraulickým posouzení stokové sítě v obci Lipůvka pomocí simulačního modelu. Obsažena je zde kapitola věnovaná matematickému modelování proudění vody ve stokových sítích spolu s výčtem některých softwarových prostředků používaných k řešení této problematiky. Popsána je provedená měrná kampaň, jejíž výstupy byly použity ke kalibraci a verifikaci vytvořeného simulačního modelu stokové sítě. Na kalibrovaném simulačním modelu byla provedena série zátěžových simulací s cílem zjistit kapacitně nevyhovující úseky stokové sítě.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Simulační model, stoková síť, měrná kampaň, kalibrace a verifikace

## **ABSTRACT**

Diploma thesis is focused on hydraulic assessment of Lipůvka's sewer system, done by dynamic rainfall-runoff simulation model. Because of this fact, chapter about mathematical models is included. Commonly used programs to this actions are listed as well. Next part of the thesis describes monitoring campaign, which was done in Lipůvka and results are used to calibrate the simulation model. Hydraulic assessment of sewer system by this calibrated model was done.

## **KEYWORDS**

Simulation model, sewer system, monitoring campaign, calibration, verification



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Jan Balas *Hydraulické posouzení stokové sítě obce Lipůvka*. Brno, 2017. 114 s., 20 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Petr Hlušík, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

---

Bc. Jan Balas  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Hlušíkovi, Ph.D., za jeho ochotu mi vždy poskytnout rady a věcné připomínky. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli data, přístroje a cenné rady k tvorbě diplomové práce. Poděkování patří také rodině a přátelům za podporu během studia.

.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
1.1	Cíl práce.....	11
1.2	Legislativa.....	11
<b>2</b>	<b>MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ .....</b>	<b>13</b>
2.1	Matematické modelování proudění vody ve stokových sítích.....	13
2.1.1	Modelování proudění v úseku sítě.....	14
2.1.2	Modelování uzlů.....	17
2.1.3	Počáteční a okrajové podmínky.....	17
2.1.4	Typy úloh.....	18
2.2	Používaný software (simulační programy).....	18
2.2.1	MOUSE.....	19
2.2.2	Mike Urban.....	20
2.2.3	Siteflow.....	20
2.2.4	SWMM.....	21
2.3	Kalibrace a verifikace simulačních modelů.....	23
<b>3</b>	<b>MĚRNÁ KAMPAŇ .....</b>	<b>26</b>
3.1	Srážkoměry.....	26
3.1.1	Datalogery.....	28
3.1.2	Kalibrace srážkoměru.....	32
3.1.3	Umístění a nastavení srážkoměrů.....	33
3.2	Průtokoměr.....	36
3.2.1	Obecně k měření průtoků ve stokové síti.....	36
3.2.2	Použitý ultrazvukový průtokoměr Sigma 950.....	38
3.2.3	Princip měření průtoku.....	39
3.2.4	Kalibrace průtokoměru.....	39
3.2.5	Umístění průtokoměru.....	40
3.2.6	Osazení a nastavení průtokoměru.....	42
3.3	Výstupy z měrné kampaně.....	49
3.3.1	Srážková data.....	49
3.3.2	Data průtokoměru.....	63
<b>4</b>	<b>SIMULAČNÍ MODEL .....</b>	<b>72</b>
4.1	Popis zájmového území.....	72
4.2	Popis stokové sítě.....	73
4.2.1	Vírový separátor.....	77
4.2.2	Vodní recipient.....	79
4.3	Podklady pro tvorbu.....	79

4.3.1	Geodetické podklady.....	80
4.3.2	Hydraulické údaje .....	80
4.3.3	Hydrologické podklady.....	81
<b>4.4</b>	<b>Tvorba simulačního modelu.....</b>	<b>82</b>
4.4.1	Schematizace modelu.....	82
4.4.2	Vytvořený model.....	84
4.4.3	Kalibrace a verifikace vytvořeného simulačního modelu .....	84
<b>5</b>	<b>POSOUZENÍ STOKOVÉ SÍTĚ.....</b>	<b>89</b>
5.1	Zátěžové srážky .....	89
5.2	Vyhodnocení .....	90
5.2.1	Posouzení kapacity stokové sítě.....	91
5.2.2	Posouzení rychlosti proudění .....	97
5.2.3	Shrnutí výsledků .....	98
5.3	Finanční analýza.....	99
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>104</b>
<b>7</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>106</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>108</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>109</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>111</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>113</b>
	<b>SUMMARY .....</b>	<b>114</b>

# 1 ÚVOD

Městské odvodnění je převážně inženýrská disciplína, která je součástí vodního hospodářství urbanizovaných území. Tvoří jeden ze základních prvků zajišťujících životní úroveň, komfort a ochranu zdraví populace na úrovni odpovídající počátku třetího tisíciletí. Současný systém městského odvodnění byl postupně zaváděn od poloviny 19. století, kdy byly ve velkých městech nahrazovány různé decentrální systémy, které nevyhovovaly hygienickým požadavkům a požadavkům na ochranu před povodněmi. Důležitým úkolem městského odvodnění je také splnění nároků na ochranu životního prostředí. Rostoucí urbanizace krajiny způsobuje zvyšování zátěže na odvodňovací systém. Zejména změna propustných ploch na nepropustné, má zásadní vliv na produkci odpadních vod. Objem a rychlost odtoku z urbanizovaných ploch je větší, což v důsledku vede k ohrožení funkčnosti městského odvodnění. Většina obcí má v současnosti vybudované stokové systémy, které v době svého návrhu plně splňovaly požadovaný účel. Postupem doby, vývojem klimatu, či vlastní lokality dochází k potřebě rekonstrukce, obnovy, dostavby či optimalizace funkce systému s cílem udržitelného vodního hospodářství dané lokality. Ač v posledních letech pomalu dochází ke změně přístupu k hospodaření s dešťovými vodami a nově vzniklé urbanizované plochy by měly vyhovovat legislativním požadavkům v otázce odvádění dešťových vod do veřejných kanalizací, například již zmiňovaný vývoj klimatických poměrů (intenzivnější přívalové srážky) mohou způsobovat hydraulické přetížení stokových sítí i při obsluze stejné plochy srážko-odtokového povodí. Hydraulické přetížení je obecně definováno jako překročení kapacitního průtoku, ale může být vztaženo i k určité úrovni hladiny. Hydraulická kapacita stokové sítě je limitována kapacitním průtokem, který je definován jako průtok, při němž se hladina v uzavřených průřezích stok dostane k hornímu záklenku stoky a průřez se zaplní. Pokud je tento průtok překročen, proudění ve stoce se dostává do tlakového režimu a ta je považována za hydraulicky přetíženou. Následkem může být zvýšení rizika poškození stokové sítě, zejména jejího stavebního stavu a výstroje šachet (např. zařízení pro monitoring či řízení systému). Následky závažnější vznikají v případě, kdy voda vytéká na povrch povodí či do sklepů nemovitostí a může dojít k ohrožení zdraví obyvatelstva či vzniku škod na majetku. Jelikož došlo v posledních 20 letech k výraznému posunu na poli hydroinformatiky a simulačního modelování, nachází se na trhu spousta produktů využitelných pro potřeby matematického modelování vodohospodářských sítí. Je tedy umožněno používání simulačních prostředků pro návrhy a posuzování systémů různých velikostí. Opírat se o výstupy vypočtené simulačními modely, ať už při rekonstrukcích vodohospodářské infrastruktury či plánování rozvoje obcí, nemusí být výhradou jen velkých měst, jako v nedávné minulosti. [3, 4, 6]

## 1.1 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je provést posouzení stokové sítě obce Lipůvka pomocí simulačního programu SWMM (Storm Water Management Model). Úkolem je vytvořit simulační srážko-odtokový model stokové sítě (dále také simulační model) a následně provést jeho kalibraci. Součástí práce bude provedení měrné kampaně, jejíž výstupy budou následně použity při zmíněné kalibraci a verifikaci vytvořeného simulačního modelu stokové sítě obce Lipůvka. Na kalibrovaném modelu bude provedeno jeho hydraulické posouzení, při různých zátěžových stavech. Výstupem posouzení budou vytipované kapacitně nevyhovující úseky. Pro ty bude následně doporučeno technické řešení rekonstrukce, které bude finančně podloženo.

## 1.2 LEGISLATIVA

Tato kapitola se věnuje vybraným legislativním předpisům, platným na našem území, které se týkají problematiky řešené v této diplomové práci.

### ***Zákony***

Zákon č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích, ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů

### ***Normy***

ČSN EN 752 Odvodňovací systémy vně budov [1]

ČSN 75 6101 Stokové sítě a kanalizační přípojky [2]

ČSN 01 3463 Výkresy inženýrských staveb – výkresy kanalizace

ČSN EN 752, 6.3.2 Posouzení hydraulické kapacity: Podle výsledků hydraulických průzkumů a zkoušek a/nebo ověřování pomocí odtokového simulačního modelu se posuzuje hydraulická účinnost systému ve vztahu ke stanoveným požadavkům pro různé srážkové události.

Tyto požadavky obsahují kritéria návrhu či posouzení. Jedná se například o četnost zátěžových dešťů doporučených pro daný druh území. Také doporučuje při návrhu zohlednit vývoj klimatu pro zabezpečení správné funkčnosti systému po celou dobu plánované životnosti.

Co se týče samotného výpočtu, jsou zde uvedena doporučení pro výpočet jak povrchového odtoku, tak proudění vody v potrubí. Uvedeny jsou typy možných výpočtových metod od jednoduchých empirických po složité hydrodynamické metody, počítané simulačními prostředky. Jejich použití norma schvaluje při řešení velkých i malých odvodňovacích systémů. [1]



Dle ČSN 75 6101 se zásady pro posuzování stokových sítí řídí odstavcem číslo 5 *Navrhování stokových sítí*.

V úvodu odstavce 5.3 se norma odkazuje na ČSN EN 752, která má stanovovat zásady hydraulických výpočtů. Co se týče množství dešťových vod odváděných stokovou sítí, jsou zde popsány metody stanovení srážko-odtokových povodí a doporučeno jejich použití dle typů odvodňovaného území (hustá zástavba, extravilán, sídlištní celky). Uvedeny jsou zde také doporučení ke stanovení zátěžových srážek. Obecně se norma věnuje podrobněji postupům při použití jednoduchých metod výpočtu.

V obou případech se legislativní předpisy shodují na tom, že rozhodujícím průtokem při řešení jednotné kanalizační soustavy je průtok dešťových vod. Ke stanovení průtoku vod splaškových, který se podílí na celkovém množství zanedbatelně, jsou zde uvedeny postupy. Je však přednostně doporučeno, pokud je to možné, stanovit tento průtok dle výsledků z prováděného měření průtoku splaškových vod. [2]

Součástí práce je provedení měrné kampaně v zájmové lokalitě. Jedná se o měření průtoků ve stokové síti současně s měřením srážek. Co se týče legislativy a měření na stokové síti, je rozhodující, k jakému účelu měření slouží. Pokud se má jednat o měřidlo v platebním styku, váže se k němu celá řada předpisů a nařízení (např. Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů; Zákon 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích, ve znění pozdějších předpisů), navíc musí mít osoba měření provádějící platnou autorizaci ÚNMZ. Co se týče kalibrační lhůty u přístrojů pro měření o volné hladině, ta není přesně daná, jako u měřidel stanovených (např. domovní vodoměr), ale pouze doporučená (dle protečeného množství za rok). K měrné kampani, respektive k měřicím přístrojům používaným k těmto úkonům, se však žádné legislativní požadavky nevztahují.

## 2 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Definice termínu *model* je v současnosti k dohledání celá řada. Modely se objevují v každodenním životě nás všech, ať už o tom víme nebo ne, jelikož jsou používány v řadě oborů lidské činnosti. Ať už se jedná o meteorologii, dopravu, energetiku, ekonomii, sociologii a další. Jednotlivé obory, pro něž byly modely formulovány, si je definují posvém. Obecně se dá termín model definovat jako schematické, účelově zjednodušené znázornění reálného nebo abstraktního světa (systému), na určitém místě v čase nebo prostoru, určené k pochopení tohoto systému. [12]

Jelikož tato práce spadá svou podstatou do oblasti vodohospodářské, řídící se fyzikálními zákony, méně obecnou definicí může být tato. Model je abstrakcí získaný obraz určitých vlastností objektu, který je pokud možno jednoduchý. Kvalitu modelu vystihuje přesnost popisu daného objektu, jednoduchost a stupeň vystižení zákonitostí platících pro objekt. [13]

Modely můžeme jednoduše rozdělit na **materiální** a **abstraktní**. Materiálními myslíme staticky hmotné modely. Ty umožňují sledovat děj přímo na prototypu nebo častěji na *fyzikálním modelu* v jiném než skutečném měřítku. Abstraktní modely jsou tvořeny systémem symbolů a vztahů, tedy nehmatatelné. Mohou být *verbální* či *verbálně grafické*, nebo matematické.

*„Matematický model je popis určitého výseku vnějšího světa matematickými prostředky. Je to obecnější druh modelu, který se dělí na:*

- *abstraktní, ideově matematický model – výpočtový algoritmus;*
- *exaktní teoretické řešení – výpočtový model dané úlohy;*
- *konkrétní, předmětový matematický model, kterým může být nastavené řešení na počítači.“* [13]

Matematické modely popisující proudění tekutin můžeme dělit například dle hydraulického režimu proudění (laminární, turbulentní), časového režimu (statické, dynamické), prostorové dimenze (1D, 2D, 3D), povahy vstupních a hledaných veličin (stochastické, deterministické), nebo podle účelu, ke kterému bude model sloužit (optimalizační, řídící, simulační). [13]

### 2.1 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY VE STOKOVÝCH SÍTÍCH

Proudění ve stokové síti za bezdeštného období lze zjednodušeně charakterizovat jako jednorozměrné ustálené nerovnoměrné, popř. jednorozměrné pomalu se měnící nerovnoměrné proudění. Průtoky splaškových vod lze totiž považovat za málo se měnící až konstantní. Povodňové vlny splaškových odpadních vod se dají očekávat jen tam, kde je připojeno mnoho obyvatel s přibližně podobným denním režimem, tedy na sídlištích.

Naopak popis proudění v jednotných či dešťových stokových soustavách za deště je komplikovaný. Například při přivalových deštích se do sítě dostane velké množství vody v malém časovém úseku, což má za následek rychlou změnu plnění, pohyblivý vodní skok, přechod mezi říčním a bystřinným prouděním, přechod mezi prouděním o volné hladině a tlakovým. Tyto jevy mohou způsobovat nestability při řešení. [11,13]

Matematický popis proudění vody ve stokové síti vychází ze zákona zachování hmotnosti (rovnice kontinuity), pohybové rovnice, větě o hybnosti a zákona zachování mechanické energie proudu (Bernoulliho rovnice).

Stokovou síť lze podle podstatné hydraulické funkce rozdělit na:

- transportní prvky – potrubí, shybky;
- spojovací prvky – šachty, spojné komory;
- prvky s retenční funkcí – nádrže, čerpací jímky;
- rozdělovací prvky – odlehčovací či rozbočné komory;
- regulační prvky – stavítka, klapky.

Tyto prvky tvoří v modelech takzvané *úseky* a *uzly*, kdy mezi úseky patří transportní prvky a mezi uzly pak prvky zbylé. Platí, že pro popis úseků a uzlů se používají jiné rovnice. Proudění v úsecích se většinou popisuje zjednodušenými jednodimenzionálními rovnicemi, kdežto uzly tvoří okrajové podmínky. [11]

### 2.1.1 Modelování proudění v úseku sítě

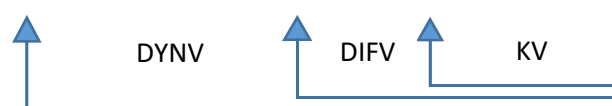
Jak již bylo zmíněno, pro praktické aplikace se při hydraulickém popisu proudění v úseku uvažuje *jednorozměrné pomalu se měnící neustálené proudění*. Základní rovnice odvodil v roce 1871 Barré de Saint-Venant za předpokladu, že platí:

- V průtočném průřezu je vodorovná hladina, závisle proměnnými jsou dvojice veličin. Například průtok  $Q = f(x, t)$  a hloubka  $y = f(x, t)$  nebo průřezová rychlost  $v = f(x, t)$  a hloubka  $x = f(x, t)$  nebo průtok  $Q = f(x, t)$  a průřezová plocha  $A = f(x, t)$ . Závislé proměnné se mění pouze po podélné ose kanálu, která se předpokládá jako přímková.
- Proudění se nemění náhle ale pozvolně.
- Koryto má pravoúhlý tvar, sklon dna je malý a uvažuje se nepohyblivé dno.
- Zakřivení proudnic je malé a zrychlení ve směru vertikálním zanedbatelné.
- Rozdělení tlaků v průřezu je přibližně hydrostatické.
- Odpor proti proudění je aproximovatelný součinitelem tření a rovnicemi používanými při ustáleném rovnoměrném proudění.
- Hybnost bočních přítoků je zanedbatelná. [11,13]

Řídící rovnice tvoří rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

a pohybová rovnice:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAi_E = gAi_0 \quad (2.2)$$


The diagram shows three blue arrows pointing upwards from a horizontal line. The first arrow is labeled 'DYNV' and points to the term  $\frac{\partial Q}{\partial t}$ . The second arrow is labeled 'DIFV' and points to the term  $\frac{\partial \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x}$ . The third arrow is labeled 'KV' and points to the term  $gA \frac{\partial y}{\partial x}$ .

Kde jednotlivé členy charakterizují:

- |       |  |
|-------|--|
| 1 + 2 | síly setrvačnosti (lokální a konvektivní zrychlení), |
| 3     | síly tlakové,  |
| 4     | síly odporové (třecí),                               |
| 5     | síla gravitační,                                     |

- |     |            |     |   |
|-----|------------|-----|---|
| kde | $y(x,t)$   | ... | hloubka vody v průtočném průřezu [m],                           |
|     | $A(x,t)$   | ... | průtočná plocha [m <sup>2</sup> ],                              |
|     | $Q(x,t)$   | ... | průtočné množství [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ],           |
|     | $g$        | ... | tíhové zrychlení [m·s <sup>-2</sup> ],                          |
|     | $i_0(x)$   | ... | sklon dna potrubí,  |
|     | $i_E(x,t)$ | ... | sklon čáry energie,   |
|     | $\beta$    | ... | Boussinesqův souč. hybnosti - závisí na rozd. rychl. v profilu, |
|     | $x$        | ... | délková souřadnice podél osy potrubí [m],                       |
|     | $t$        | ... | čas [s].  |

Převedením rovnic z *konzervativního tvaru* (průtok se při proudění zachovává) do *nekonzervativního tvaru* při použití rychlosti a hloubky jako závislých proměnných, které se mohou při proudění měnit skokem, získá rovnice kontinuity tvar:

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

Kde  $v(x,t)$  ... průřezová rychlost [m·s<sup>-1</sup>].

a pro pohybovou rovnici po úpravě platí:

$$i_E = i_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{\partial \left( \frac{v^2}{2g} \right)}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.4)$$

1      2      3      4      5

Když si jednotlivé prvky rovnice opět číselně označíme, můžeme říci, že pokud by rovnice obsahovala pouze členy 1 a 2 popisovala by ustálené rovnoměrné proudění, kdy si jsou rovny sklony čáry energie i dna. Pokud přidáme člen 3 (změna výšky po délce) a člen 4 (změna rychlostní výšky po délce) dostaneme rovnici popisující ustálené nerovnoměrné proudění. Přiřazením členu 5 (lokální zrychlení) dostaneme rovnici pro neustálené nerovnoměrné proudění. [11]

Pro potřeby výpočtu se rovnice běžně zjednodušují. To se provádí zanedbáním některých členů rovnice. Pokud v pohybové rovnici (2.2) uvažujeme všechny členy, jedná se o tzv. *dynamickou vlnu* (dále DYNV). Pokud se zanedbají síly setrvačnosti, jedná se o aproximaci *difúzní vlnou* (dále DIFV). Budeme-li uvažovat pouze síly odporové a gravitační, jde o aproximaci kinematickou vlnou (dále KV).

Při užití těchto zjednodušení musíme samozřejmě počítat jak se vznikem nepřesností, tak s omezením týkajícím se simulovatelných jevů.

Při použití KV není možné řešit zpětné vzdutí, nepostihuje snížení kulminačního průtoku a změnu tvaru hydrogramu při jeho kulminaci. Neumožňuje počítat při nulovém nebo záporném spádu nivelety dna potrubí, bez speciálního přístupu ani výpočet tlakového proudění. Použití KV je tak velmi omezené, doporučit lze pouze pro bystřinné proudění.

Při použití DIFV je možné postihnout vliv zpětného vzdutí a jedná se o poměrně přesnou metodu. Použití však není vhodné při rychlých změnách hydraulických veličin v čase, kdy nelze zanedbat vliv setrvačných sil.

Aproximace DYNV dokáže popsat transformaci hydrogramu z výše uvedených aproximací nejlépe. Díky její komplexnosti jsou však při výpočtu vyžadovány menší časové kroky. [11,13]

Přestože uvedené rovnice Saint-Venanta vycházejí z mnoha zjednodušení, je jejich řešení obtížné. Rovnice tvoří hyperbolickou soustavu parciálních diferenciálních rovnic, které jsou nelineární a nemají analytické řešení. Proto musíme používat metody, které nám umožní získat řešení blízké přesnému. Jedná se o metody numerické, a to zejména metoda konečných diferencí (MKD). V ní se parciální difference proměnných (např.  $Q$ ,  $A$ ) nahrazují konečnými diferencemi. Při řešení je pak nutné znát okrajové a počáteční podmínky (viz 2.1.3).

## **Řešení tlakového proudění**

Výskyt tlakového proudění ve stokových sítích není neobvyklým jevem. Při extrémních přívalových srážkách, které se vyskytují běžně každým rokem, si asi každý mohl všimnout vyvěrající, či tryskající vody z poklopů nebo dešťových vpustí.

Při překročení kapacitního plnění stoky dochází ke změně hledaných neznámých. A to z hledaného průtoku  $Q(x,t)$  a plochy  $A(x,t)$  na hledaný průtok  $Q(x,t)$  a tlak  $p(x,t)$ . Jak již víme, řídicí de Saint-Venantovy rovnice platí pouze pro proudění s volnou hladinou. Tvůrci matematických modelů se proto snaží nalézt takovou metodu, která umožní aproximovat proudění o volné hladině i proudění tlakové jedním algoritmem, aby při řešení nedocházelo k problémům s přechodem mezi nimi. Jedno z možných řešení předvedl ve své teoretické práci Preissmann a Cunge v roce 1961, které bývá označováno jako Preissmannova štěrbinu. Jedná se o hypotetickou velmi úzkou štěrbinu nasazenou na vrchol potrubí, v níž se tvoří sloupec vody, který odpovídá poloze tlakové čáry v potrubí. Tento postup tedy umožňuje aproximaci tlakového proudění při zachování řídicích rovnic (2.1) a (2.2). [11,13]

### **2.1.2 Modelování uzlů**

Jak již bylo řečeno, model stokové sítě je složen z úseků (zejména potrubí) a uzlů (objekty), které tvoří úsekům ohraničení a zajišťují okrajové podmínky pro simulace hydrodynamických jevů v potrubí. Při průchodu objektem je tedy nutné použít jiný systém rovnic, který je svázán s původními řídicími rovnicemi přes styčné body v koncových profilech potrubí. Většinou je použita rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice (zachování mechanické energie proudu), případně rovnice popisující regulační funkci prvku (např. rovnice přepadu).

Pokud se na síti objevují složité objekty, ve kterých není možné popsat proudění pomocí jednoduchých hydraulických vztahů, je vhodné využít fyzikálního modelu v laboratoři nebo použít matematické modelování 3D proudění. Vstupy do tohoto 3D modelu můžeme získat z 1D modelu stokové sítě a následně výstupy z 3D modelu objektu použít v 1D modelu stokové sítě. [11,13]

### **2.1.3 Počáteční a okrajové podmínky**

Řešení parciálních diferenciálních rovnic (2.1) a (2.2) vyžaduje počáteční a okrajové podmínky. Pokud se budeme bavit o simulaci DYNV, bude se jednat o počáteční a dvě okrajové podmínky. Podmínka počáteční bývá zadávána výpočtem průběhu hladin pomocí ustáleného nerovnoměrného proudění, a to za předpokladu, že průtok je v počátečním čase konstantní. První z podmínek okrajových je ve formě hydrogramů. Buďto získaného ze simulace povrchového odtoku, nebo individuálně zadaného hydrogramu. Jedná se tedy o průtok  $Q=Q(t)$ , který vtéká do uzlu. Druhá okrajová podmínka je zadávána do uzlu výstupního. Jedná se například o časově proměnnou výšku vody v recipientu  $H=H(t)$ .

## 2.1.4 Typy úloh

Řešení některých vodohospodářských úloh je tak složité, že se bez použití simulačních modelů neobejde. Jednou z podstatných výhod simulačních modelů je skutečnost, že umožňují do určité míry nahradit omezenost provozních měření a poskytnout statisticky zpracované výsledky z dlouhodobých simulací. Umožňují také studium různých scénářů, týkajících se rozvoje systému, přijatých opatření i různých provozních stavů. [3]

Matematickými simulačními modely můžeme řešit tyto typy úloh:

- návrh a posouzení stokové sítě;
- detailní hydraulické posouzení části sítě nebo objektů;
- řízení systému v reálném čase;
- analýzu vlivu vypouštěných OV na recipient, simulaci transportu znečištění a sedimentů ve stokové síti. [13]

## 2.2 POUŽÍVANÝ SOFTWARE (SIMULAČNÍ PROGRAMY)

V této kapitole jsem vycházel z mé bakalářské práce, kterou jsem zpracoval na ÚVHO FAST VUT v roce 2015:

Jan Balas *Posouzení vybrané části kanalizace v obci*. Brno, 2015. 60 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Petr Hlušík, Ph.D. [28]

K tvorbě simulačních modelů se používají simulační programy, které jsou dnes nepostradatelnou součástí inženýrských prací v oboru městského odvodnění. Pomocí těchto výpočetních prostředků může v současnosti každý inženýr řešit úlohy v takovém rozsahu a stupni podrobnosti, který byl ještě před několika desítkami let nepředstavitelný.

*Simulační model* je matematický popis sledovaných procesů. V praxi je často do tohoto pojmu zahrnován i jeho počítačový program.

*Simulační program* je strukturovaný pokyn k numerickému zpracování simulačních modelů v počítači. Programem je stanoven i způsob vkládání vstupních dat a forma výstupů (vypočtené výsledky).

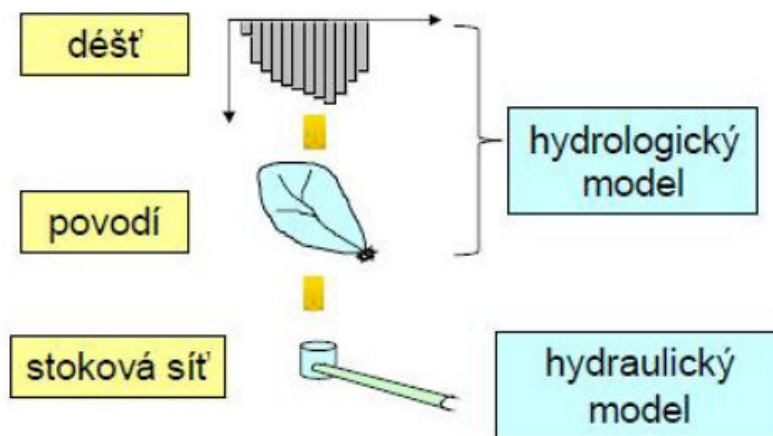
Při řešení odtoku v urbanizovaném prostředí rozlišujeme dva hlavní typy modelů. Jedná se o modely hydrologické a modely hydraulické.

*Modely hydrologické* se zabývají tvorbou povrchového odtoku, tvorbou efektivního deště (dešť zmenšen o ztráty) a jeho transformací na odtokový hydrogram. Tyto modely se liší podrobností popisu povodí, z kterého je odtok realizován, vzniklých ztrát a metodou výpočtu. Používané metody výpočtu koncentrace odtoku jsou buďto empirické (metoda



izochron, lineární rezervoár, jednotkový hydrogram) nebo výpočtové metody založené na fyzikálním popisu transportu vody v povodí (nelineární rezervoár- kinematická vlna).

*Modely hydraulické* používají fyzikálně založené metody výpočtu. Jedná se o výpočty týkající se toku ve stokové síti.



Obr. 1 Simulační srážko-odtokové modely. [3]

Pro simulaci srážko-odtokového procesu je dnes k dispozici široká nabídka simulačních programů, převážně komerčního charakteru. Ty jsou totiž díky přístupnosti, profesionální a dlouhodobé podpoře v praxi nejčastěji voleny. Následující podkapitoly se věnují popisu vybraných programů, se kterými se můžeme nejčastěji setkat. [28]

### 2.2.1 MOUSE

MOUSE (zkratka Model for Urban Sewer) je hydrodynamický simulační model a program vyvinutý Dánským Hydraulickým Institutem (dále DHI). Model je vhodný pro posouzení stokového systému jednotné i oddílné, větevné i okružové kanalizační sítě.

Mezi základní moduly programu patří:

*Modul povrchového odtoku*

*Hydrodynamický modul*- proudění v kanalizační síti řešeno Saint-Venantovými pohybovými rovnicemi doplněnými rovnicí kontinuity. Možnost řešení tlakového i netlakového proudění.

*MikeView*- prezentační modul, který slouží pro zobrazování modelem vypočtených výsledků.

V programu je možné stokovou síť doplňovat odlehčovacími komorami s čelním i bočním přelivem, čerpacími stanicemi, shybkami, retenčními nádržemi, škrťacími tratěmi apod. Kanalizační síť může být následně zatěžována uživateli zvolenými průtoky nebo hydrogramy z povrchového odtoku. Výsledkem simulací jsou výšky hladin, průtoky a rychlosti zjistitelné ve všech osazených objektech.

V současnosti se od používání samotného programu MOUSE upouští. Společnost DHI vyvinula komplexnější program MIKE URBAN, kde model MOUSE tvoří výpočetní jádro. [28]

### 2.2.2 Mike Urban

Mike Urban je simulační program, který byl vyvinut společností DHI k modelování vodohospodářských sítí ve městech. Jedná se o flexibilní program spolupracující se systémem GIS. V programu je možno modelovat oddílné i jednotné stokové systémy, srážkové odvodňovací systémy a vodovodní distribuční systémy.

Jádro uživatelského rozhraní programu MIKE URBAN tvoří *Program Manager* (dále PM). Pomocí PM jsou zadávána vstupní data, je provedena simulace i zobrazení výstupů. PM dále poskytuje správu dat všech vodohospodářských sítí a bohatou paletu funkcí GIS na platformě ESRI ArcGIS. Tato standardizace má velkou výhodu v oblasti datové komunikace. ESRI produkty jsou v současnosti standardem ve státní správě ČR i v zahraničí.

Výpočetní jádro programu MIKE URBAN je tvořeno simulačními modely:

*MOUSE*, *MIKE 1D*, *SWMM* pro modelování kanalizační sítě,  
*EPANET* pro modelování distribuční sítě zásobování pitnou vodou.

Moduly systému:

*Povrchový odtok* je řešen metodami výpočtu izochron, lineární rezervoár, jednotkový hydrogram, nelineární rezervoár. Výpočet je řešen i infiltrace.

*Modul Pipeflow* simuluje proudění v potrubí. Výpočet je řešen Saint-Venantovými pohybovými rovnicemi doplněnými rovnicí kontinuity.

*Modul transportu znečištění* zahrnuje disperzi, advekci a transport sedimentů.

*Modul biologických procesů* zahrnuje simulaci chemických a biologických procesů v kanalizaci.

*MikeView* - prezentační modul, který slouží pro zobrazování modelem vypočtených výsledků.

Model stokové sítě vytvořené programem MIKE URBAN může obsahovat základní objekty rozšířené například o jezové objekty a regulátory průtoku. Umožněno je provádění dlouhodobých simulací. Program obsahuje automatický nástroj návrhu dimenze potrubí. [28]

### 2.2.3 Siteflow

SiteFlow je software pro správu, projektování a simulační modelování stokových, vodovodních i plynovodních sítí a dále závlahových a drenážních systémů. Software je vyvíjen firmou Aqion, s.r.o. Při práci využívá současně prostředky GIS, CAD

a matematický simulační model, který umožňuje posuzovat jak tlakové tak gravitační systémy. Program SiteFlow používá k výpočtům dvě výpočetní jádra:

*SWMM* pro modelování srážko-odtokových procesů a proudění s volnou hladinou;

*EPANET* pro tlakové proudění.

SiteFlow je komplexní program, který je možno použít ve třech úrovních. Vývojářská společnost na této komplexnosti vede svou prodejní kampaň a vyzdvihuje časovou úsporu, které mohou projektanti a provozovatelé vodohospodářské infrastruktury dosáhnout při používání tohoto softwaru. Mezi oblasti použití patří:

*Použití jako GIS* vhodné zejména pro střední a malé provozovatele a vlastníky vodovodů a kanalizací.

*Projektování*, kde k hlavním funkcím patří odečítání výšek z digitálního modelu terénu, vytváření situací a podélných profilů, soupisy materiálů a zemních prací. Vytvořený podélný profil je provázán se situací, takže jakákoliv provedená změna v jednom z výkresů se automaticky projeví i v druhém. Veškeré výstupy je možné exportovat do formátu dxf, xls, tin a txt. Dalším vhodným doplňkem je obsazení knihoven (materiál, čerpadla, vodojemy, křivky srážek, příčné profily výkopů, aj.), které je možné rozšiřovat, a které jsou k dispozici ve všech oblastech.

*Simulační modelování* je prováděno již výše zmíněnými, mezinárodně respektovanými, výpočetními jádry SWMM a EPANET. [28]

## 2.2.4 SWMM

Jelikož byl simulační model tvořen v tomto programu, jeho popis je detailnější.

Program SWMM (Storm Water Managment Model) je program vyvinutý agenturou U.S. EPA (agentura pro ochranu životního prostředí Spojených států amerických). První verze programu byla vyvinuta v roce 1971. Od té doby prošla několika významnými vylepšeními. Nyní je k dostání ve verzi 5. Program SWMM je používán po celém světě k plánování, analýzám a návrhům týkajících se dešťového odtoku, jednotné a splaškové kanalizace a dalších odvodňovacích systémů v městských oblastech. Jedná se o dynamický, srážko-odtokový simulační model používaný pro jednu událost nebo dlouhodobé simulace odtokového množství a kvality vod převážně z urbanizovaného území. [27]

Model sleduje kvantitu a kvalitu odtoku vzniklého v rámci každého povodí a průtok, hloubku a kvalitu vody v každém úseku potrubí nebo otevřeného kanálu. Simulační doba v jednotlivých kanálech a potrubích se skládá z více časových kroků. Výsledky mohou být zobrazovány jako barevné mapy povodí, grafy a tabulky časových řad nebo statistické frekvenční analýzy. Odtokový proces je založen na *subpovodích* (subcatchment), kde je realizována srážka a vzniká zde povrchový odtok a jeho znečištění. Dále je odtok veden do systému *potrubí, kanálů*, možné je i zařazení *dešťových zdrží, přečerpávacích stanic, regulátorů čištění*. [27]

Hydrologické procesy, které model dokáže počítat, jsou:

- časově proměnné srážky;
- povrchový výpar;
- sněhová akumulace a tání;
- povrchová retence;
- infiltrace do nenasycených půdních vrstev;
- povrchový odtok pomocí nelineárního rezervoáru;
- a další.

Z hydraulického hlediska, které je používáno pro modelování toku vody v síti, je umožněno:

- navrhování neomezeně velké sítě;
- použití široké nabídky potrubí, kanálů i přírodních koryt;
- modelování speciálních prvků jako např. zdrží, rozdělovačů průtoků, čerpadel;
- využívat výpočetní metody kinematickou nebo dynamickou vlnu;
- modelovat různé zátěžové stavy;
- a další.

Program je volně stažitelný na webových stránkách U.S. EPA: (<http://www2.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>).

Je naprogramován v jazyce C a pracuje na operačních systémech Windows (XP, Vista, 7, 8.1, 10). [27]

### ***Metody výpočtu proudění vody v potrubí***

Proudění vody v potrubí se řídí zákony zachování hmotnosti a hybnosti za použití Saint-Venantových pohybových rovnic. Při simulacích máme možnost výběru ze tří programem používaných metod výpočtu proudění.

#### **Ustálené rovnoměrné**

Jedná se o nejjednodušší možný typ výpočtu. Prítokový hydrogram je jednoduše zaústěn v horním konci potrubí a beze změn převeden k dolnímu konci potrubí. Tento typ neumí počítat potrubní retenci, zpětné vzduť, ztráty na vtocích a výtocích. Při použití této metody musí mít každý uzel jeden přítok i odtok, není možné použití u sítí, které obsahují rozdělovače průtoků.

### **Kinematická vlna**

Tato výpočtová metoda je řešena pomocí rovnice kontinuity a zjednodušené rovnice hybnosti v každém potrubním úseku. Předpokladem je, že sklon hladiny je roven sklonu potrubí. Maximální průtok, který dokáže potrubí převést je průtok kapacitní. Metoda nedokáže počítat s tlakovým prouděním. Veškerý průtok nad hodnotu kapacitního průtoku je buďto zanedbán, nebo „uskladněn“ na povrchu a po uvolnění kapacity tato voda vteče zpět do systému. Kinematická vlna umožňuje průtočné a plošné změny v potrubí v závislosti na čase a místě. To může způsobit zpoždění průtočného hydrogramu. Nicméně metoda nedokáže počítat ztráty na vtocích a výtocích, zpětné vzduť, tlakové proudění. Metoda je numericky stabilní při použití středně dlouhých časových kroků v řádu 5 až 15 minut. V případě, že výše uvedená omezení nejsou významná, může být tato možnost přesným a stabilním způsobem výpočtu, a to zejména pro dlouhodobé simulace.

### **Dynamická vlna**

Tato výpočtová metoda je řešena kompletními Saint-Venantovými rovnicemi. Metoda umožňuje simulaci tlakového proudění, kdy je průtok větší než kapacitní. Na rozdíl od metody výpočtu kinematickou vlnou voda vyteče na povrch až v případě, že stoupne do výšky větší, než je hloubka šachty. Pak je zanedbána nebo se vrací zpět do uzlu po uvolnění kapacity. Tato metoda dokáže počítat s potrubní retencí, vtokovými a výtokovými ztrátami, zpětným vzduť, tlakovým prouděním. Protože metoda spojuje řešení výšky hladiny v uzlech i potrubí, může být používána pro stokové sítě, které obsahují více po proudu následujících odlehčovacích komor. Metoda je vhodná pro systémy obsahující regulátory průtoku (přepady, otvory). Díky této komplexnosti jsou ovšem vyžadovány mnohem menší časové kroky, řádově minuty a méně. [27]

## **2.3 KALIBRACE A VERIFIKACE SIMULAČNÍCH MODELŮ**

Při práci s modelem je nutné vyloučit co možná nejvíce odchylek mezi skutečným a modelovaným procesem. Z toho důvodu by měl být model pro každou úlohu kalibrován a verifikován. Nekalibrovaný model je možné použít jen pro orientační srovnání variant v relativních číslech. Pro účely posouzení je tedy kalibrace a verifikace nutná. [11]

*„Pod pojmem kalibrace simulačních modelů rozumíme cílevědomé a fyzikálně správné přizpůsobení vybraných parametrů simulačních modelů. Hodnoty těchto parametrů jsou tak dlouho přizpůsobovány, až je možno rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami akceptovat.*

*Pod pojmem verifikace simulačního modelu je označeno porovnání mezi hodnotami vypočtenými kalibrovaným modelem a naměřenými hodnotami při dané události, která však nebyla použita ke kalibraci modelu. Na základě verifikace je pak posouzena přesnost použitého simulačního modelu pro řešení stanovené úlohy a provedeno rozhodnutí o použití tohoto výpočetního prostředku pro dané řešení.“ [11]*

Po provedení úspěšné kalibrace a verifikace (kdy odchylky spadají do učených mezí) však **nelze model prokázat za správný**. Toto testování modelu pouze zvyšuje jeho důvěryhodnost. To, aby simulační model reprodukoval skutečnost, navíc není ani možné, ani nutné. Model je zpravidla dostatečně přesný, pokud je dosaženo optima mezi náklady a užitek provedeného řešení. [11]

Při kalibraci a verifikaci se porovnávají odchylky mezi vypočtenými ( $y_{sim}$ ) a naměřenými ( $y_{mer}$ ) hodnotami veličin. Jedná se o průtoky, výšky hladiny a případně koncentrace, pokud je předmětem modelu simulace transportu polutantů. Pro tyto veličiny porovnáváme:

- maximum;
- objem, resp. látkové množství;
- čas dosažení maxima;
- průběhy veličin (hydrogramy, případně polutogramy). [3]

Jako měřítko odchylek se nejčastěji používá *relativní odchylka* simulovaných a měřených hodnot veličin:

$$r_r = \frac{y_{sim} - y_{mer}}{y_{mer}} \times 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

kde  $y_{sim}$  ... vypočtená hodnota [ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; m;  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ],  
 $y_{mer}$  ... naměřená hodnota [ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; m;  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ],  
 $r_r$  ... relativní odchylka [%].

Kalibraci a verifikaci můžeme, například dle (Krejčí [11]), považovat za uspokojivou, pokud odchylky nepřekračují hodnoty v následující tabulce.

Tab. 1 Doporučené odchylky při kalibraci a verifikaci. [11]

	kalibrace	verifikace
průměrná relativní odchylka	< 10 %	< 30 %

Hledání správných hodnot parametrů se provádí pomocí statistických metod nebo metodou „pokusů a omylů“. V našem případě měníme parametry jak na modelu hydraulickém (stoková síť), tak na modelu hydrologickém (povodí). Patří mezi ně:

- součinitel drsnosti potrubí  $n$ ;
- součinitel ztrát v uzlech;
- koeficient povrchového odtoku  $\Psi$ ;
- další parametry povodí.

Množství těchto dalších parametrů, která popisují povodí, se odvíjí podle použitého simulačního programu (jak detailně umí povodí a procesy popsat) a podle míry schematizace určené řešitelem. Může se jednat například o šířku povodí, sklon terénu k stokové síti a detailní popis povrchu povodí. Popis povrchu povodí je možno rozšířit o metodu řešení infiltrace, data drsností jednotlivých druhů povrchu a prohlubní k zdržování vody.

Vstupní data pro provedení kalibrace a verifikace získáme z tzv. měrné kampaně, kdy jsou současně na povodí měřeny srážky a ve stokové síti průtoky, případně výšky hladin. Podrobněji viz kap. 3.



### 3 MĚRNÁ KAMPAŇ

Měrnou kampaň neboli monitoringem se rozumí sledování reálného chování systému, prováděného zpravidla měřeními základních veličin týkajících se srážko-odtokového procesu v povodí. Základním rysem monitoringu je především systematičnost a kontinuita. Monitoring představuje koncepční, vzájemně provázanou soustavu měření včetně následného vyhodnocení. Výstupem monitoringu jsou data, většinou časové řady, jejichž interpretací získáváme požadované informace. Výsledky z měrné kampaně jsou nezbytným podkladem pro správné nastavení parametrů simulačních modelů a také poskytují informace pro provoz stokového systému. Tato data jsou ze své podstaty jedinečná a neopakovatelná, proto je třeba věnovat provádění monitoringu patřičnou pozornost. Po dobu měrné kampaně se na povodí měří srážky a ve vhodných místech na stokové síti (měrné profily) se provádí měření průtoků, případně výšek hladin. Měření se může rozšířit o sledování kvality a složení odpadní vody, pokud to projekt vyžaduje. [3,5]

Obecně je vhodné naplánovat a provádět měrnou kampaň v období od dubna do října, kdy je nejvyšší pravděpodobnost zachycení vydatných srážek. Doba krátkodobé měrné kampaně, pro účely kalibrace a verifikace simulačního modelu, by měla trvat několik týdnů (3-12). Délku samozřejmě ovlivňuje množství naměřených dat, vhodných pro tento účel, takže se může naplánovaná délka v průběhu monitoringu měnit.

Měrná kampaň v obci Lipůvka byla kompletně započata 13. 6. 2016, ukončena byla 15. 9. 2016, kdy byly všechny měřicí přístroje demontovány.

#### *Měřicí technika*

Požadavky na množství měřicích přístrojů rostou s velikostí a složitostí stokové sítě a plochou a členitostí odvodňované oblasti (povodí), na které je realizován srážko-odtokový proces. Srážkoměrné podklady jsou rozhodujícím prvkem ovlivňujícím kvalitu a přesnost matematického modelování. Právě proto se zejména rozmístěním a počtem srážkoměrů pro potřeby odvodnění urbanizovaných území v posledních dvaceti letech věnovala celá řada studií. Ty byly u nás aplikovány hlavně na velká města s rozsáhlými stokovými systémy, která počítala do budoucna s řízením odtoku. [10]

Dle (Suchánek [10], [4]) je doporučeno použití minimálně 2 srážkoměrů (100% rezerva proti výpadku) a jednoho průtokoměru. V našem případě byla k měrné kampani v obci Lipůvka využita měřicí technika patřící ÚVHO, kdy byly k dispozici 2 srážkoměry a jeden průtokoměr. Jejich umístění v obci můžeme vidět v příloze číslo 02 a 03.

#### 3.1 SRÁŽKOMĚRY

Pro měření srážkových úhrnů je vyvinuto mnoho přístrojů pracujících na různých principech, tyto přístroje označujeme souhrnně srážkoměry. Pro naše potřeby je nutné využití takového typu srážkoměru, který dokáže zaznamenat časový průběh deště. Jak již bylo uvedeno výše, je výhodné zachytit srážky, které prověří kapacitu stokové sítě.

Takovéto se nazývají *konvektivní srážky, přívalový déšť*. Vyznačují se relativně malou zasaženou plochou a dobou trvání, avšak svou vysokou intenzitou. Výskyt těchto srážek je nejpravděpodobnější v období od dubna do října.

K měření dešťových srážek byly použity 2 překlopné člunkové srážkoměry stejného typu o ploše 200 cm<sup>2</sup>.

### **Princip měření**

*„Měření srážek je založeno na principu počítání pulsů od překlopení děleného překlápěcího člunku umístěného pod výtokem nálevky. Déšť nebo sníh dopadá otvorem s přesně určenou plochou do nálevky, výtokem vtéká do horní poloviny děleného nakloněného člunku. Když se horní polovina naplní určitým nastavitelným množstvím srážek, člunek se překlopí. Tím současně vyteče voda z nyní spodní poloviny člunku a pod výtok nálevky se umístí druhá polovina děleného člunku. Střídání naplnění a překlápění člunku pokračuje po celou dobu trvání deště.*

*Feritový magnet zatmelený do těla člunku při každém překlopení sepne jazýčkový kontakt, zalitý v držáku člunku. Spínání kontaktu vytváří možnost registrovat počet překlopení (pulsů) a tím i množství srážek a jejich intenzitu v čase.“ [7]*



Obr. 2 Použitý překlopný člunkový srážkoměr.

Naměřená data je nutno zaznamenat. U plovákových ombrografů sloužil k záznamu dat registrační papír s časovým strojkem a registrační pero. U člunkových srážkoměrů, jejichž výstupy jsou ve formě elektrických pulsů, slouží k záznamu naměřených dat takzvané dataloggery.

### 3.1.1 Dataloggery

Datalogger, zkráceně logger, je zařízení sloužící k záznamu naměřených dat. Jedná se o samostatný přístroj, který dokáže číst různé typy elektrických signálů a uchovává data ve vnitřní paměti před jejich přenosem do počítače. Výhodou je jejich samostatná činnost nezávislá na počítači na rozdíl od jiných přístrojů používaných pro sběr dat. [29]

V našem případě byly použity dva druhy dataloggerů co se týče přenosu dat. Prvním byly offline loggery (*Newlog 3.24 B*), které bylo nutné pro správu a přenos dat připojit pomocí kabelu k PC, druhým typem byly online loggery (*Newlog Cello* a *Newlog 4DR*), u kterých bylo možno většinu úkonů provádět na dálku pomocí internetu.

#### 1. Původní dataloggery Newlog 3.24 B

Součástí srážkoměrů byly externí dataloggery firmy Technolog typ Newlog 3.24B s integrovanými bateriemi. Datalogger můžeme vidět na následujícím obrázku.

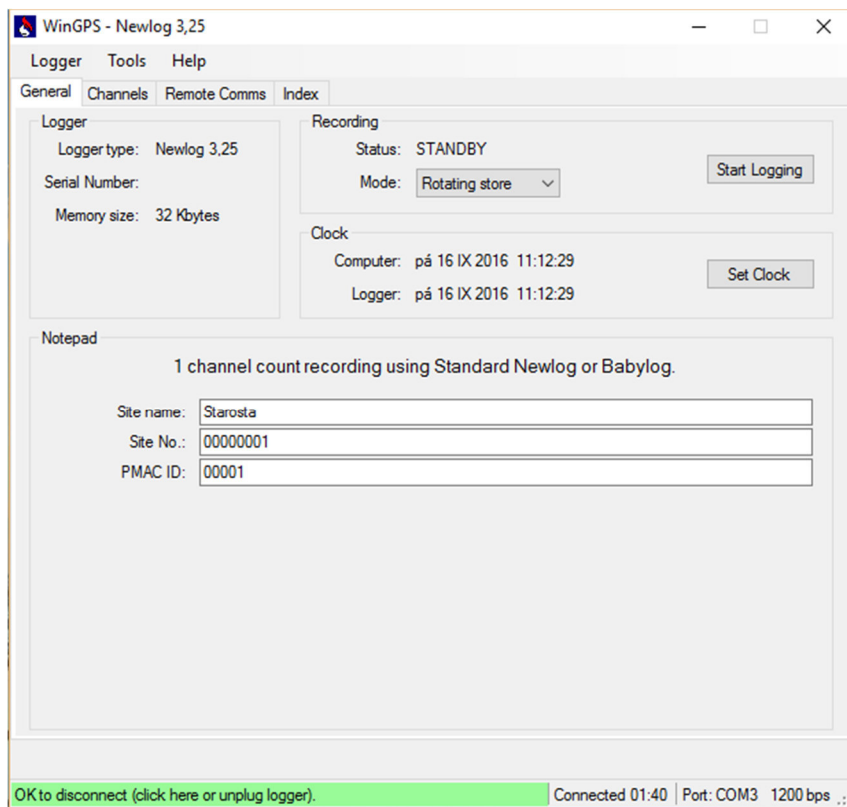


Obr. 3 Datalogger Newlog 3.24B.

Vzhledem ke stáří baterií bylo nutné provést jejich výměnu. Výdrž nové baterie je závislá na používání přístroje, běžně se tato doba pohybuje okolo 10-ti let. Krytí dataloggeru musí odpovídat vzhledem k prostředí, ve kterém se při provozu nachází, stupni ochrany IP68.

První číslo znamená odolnost proti dotyku a proti vniknutí cizích předmětů. Číslo 6 znamená krytí proti dotyku jakoukoli pomůckou a krytí proti vniknutí prachu. Druhé číslo znamená krytí proti vniknutí vody, v našem případě 8, což znamená chráněno při trvalém ponoření do vody. [9]

V šasi jsou dva otvory, uvnitř je baterie a jednotka zalita zalévací hmotou. Dovnitř vstupuje vodič, přenášející impulsy překlopení, na druhé straně je konektor k připojení datového kabelu pro přenos dat z dataloggeru do PC a pro jeho nastavení. Konektor k propojení je typu Military (přesně MIL-C-26482), pro přenos dat mezi dataloggerem a počítačem byla použita redukce MIL-C-26482 - USB. Při výměně baterií byl rovněž do dataloggeru nahrán nový firmware, který zaručuje kompatibilitu s dnešními operačními systémy počítačů.



Obr. 4 Datalogger-okno připojení.

Na obrázku č. 4 můžeme vidět okno, které se zobrazí po připojení dataloggeru k PC. V záložce general se nachází přehled informací o daném dataloggeru. Volíme zde číselné a slovní označení, v mém případě místa osazení srážkoměru. Důležité je přesné nastavení data a času pro zajištění relevantních výstupů. Dále zde vidíme stav (STANDBY/LOGGING) a typ nahrávání vzhledem k paměti. Na výběr máme 2 možnosti. Buďto přepisování paměti novými daty po jejím naplnění, nebo ukončení nahrávání po naplnění paměti. Kapacitu dataloggeru je 32 Kbytů, jak můžeme rovněž vidět na obrázku výše. Časovou periodu stahování dat z dataloggeru do počítače určuje velikost paměti a časové rozlišení zápisu dat. Tento krok zápisu je k účelům kalibrace nutno volit co nejmenší, v našem případě je volena 1 minuta. Výstupem je tedy počet překlopení za 1 minutu. S tímto časovým krokem je kapacita paměti vyčerpána za cca 10 dní.



## 2. Online dataloggery Newlog 4DR a Cello

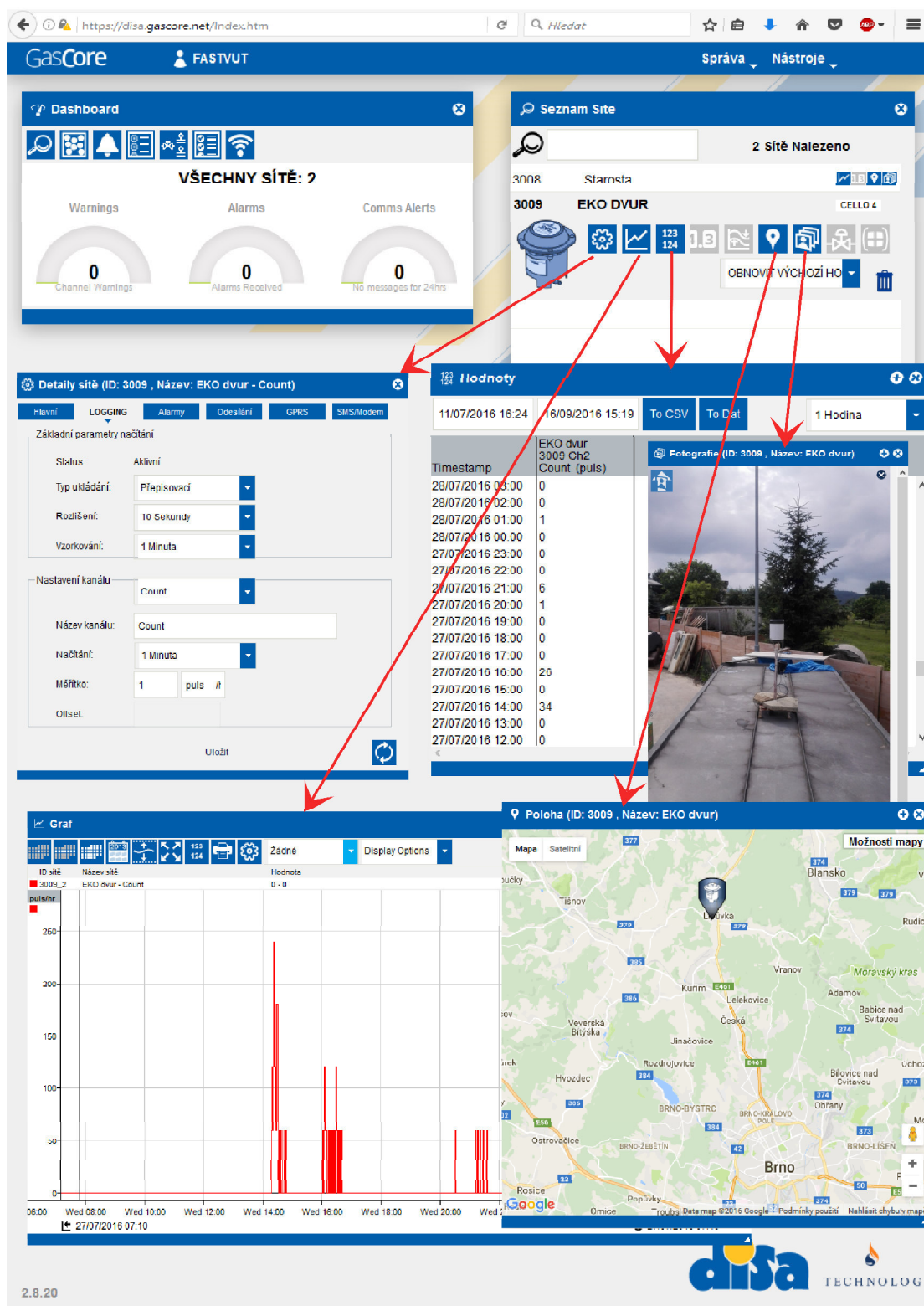
V průběhu měrné kampaně, se naskytla možnost využití online dataloggerů, namísto stávajících. Jednalo se o produkty společnosti Technolog, které byly zapůjčeny společností Disa s.r.o.



*Obr. 5 Online dataloggery*

Tyto dataloggery obsahují GSM modem, a tedy i jako mobilní telefony SIM kartu. Pro komunikaci a přenos dat je využíváno SMS zpráv a GPRS (internet). Pro sledování stavu, nastavování, stahování dat byl vytvořen přístup na zabezpečené servery spravované přímo výrobcem dataloggerů, tedy společností Technolog. Veškeré výše vypsané úkony bylo možno provádět přes webové rozhraní z libovolného místa a zařízení s přístupem k internetu.

Uživatelské prostředí pro dálkovou správu měřicí techniky je přehledné a jednoduché. Pro přehlednost je možno ke každému zařízení připojit fotografii a automaticky se přiřadí geografická poloha, která je k zobrazení na mapě. Dále je umožněno sledovat data jak ve formě tabulky, tak ve formě grafů a jejich následný export nebo tisk. Uživatelské prostředí webového rozhraní můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 6 Webové rozhraní pro správu online loggerů.

Využívání této (online) techniky s sebou nese nesporné výhody.

- Nepřijdete o žádná data z důvodu zaplnění paměti. Data se odesílají na servery výrobce, kde je provedeno jejich zálohování. Odesílání naměřených dat lze

nastavit v intervalech od 1 minuty. Musíme však počítat s tím, že vysoká četnost odesílání má negativní vliv na výdrž integrované baterie dataloggeru.

- Možnost operativního řešení problémů. Jelikož byly použity 2 srážkoměry, u nichž se očekávaly téměř shodné výstupy, data se mohla porovnávat s nevelkým zpožděním. Pokud byly mezi srážkoměry velké odchylky v naměřených datech, s velkou pravděpodobností to bylo zapříčiněno ucpáním jednoho z nich. Neprodleně se provedla jejich návštěva a problém se vyřešil. Problém je tedy možno vyřešit mnohem dříve než až v termínu pravidelné návštěvy srážkoměru.
- Možné snížení nutného počtu návštěv srážkoměrů, které jsou náročné jak finančně, tak organizačně.
- Automatická časová synchronizace.

### 3.1.2 Kalibrace srážkoměru

Pro zajištění správných datových výstupů ze srážkoměrů byla provedena kontrolní zkouška objemu člunku neboli objemu, který odpovídá jednomu impulsu/překlopení člunku srážkoměru. Toto ověření bylo provedeno zejména vzhledem k absenci jakékoliv dokumentace a záznamů o používání srážkoměrů.

Kalibrace objemu člunku byla prováděna dvěma způsoby:

- pipetou,
- odměrným válcem.

Pomocí pipety byl přímo měřen objem potřebný k jednomu překlopení. Člunky byly nejprve smočeny vodou a následně se do nich pomalu odkapávala voda z pipety. Druhým způsobem byl objem měřen nepřímo. Z odměrného válce o objemu 500 ml byla pomalu voda vlévána do trychtýře srážkoměru, tak aby se otvor pro nátok na člunky nezahlcoval vodou jako při skutečném dešti. Počet překlopení byl zaznamenán a následně vypočítán objem jednoho překlopení.

Standardně jsou člunky srážkoměru s plochou 200 cm<sup>2</sup> nastaveny tak, aby došlo k jejich překlopení při naplnění objemem 4 ml. To odpovídá úhrnu 2 mm. Takto byly nastaveny i použité srážkoměry.

Obecně přesnost člunkového srážkoměru ovlivňuje řada náhodných a systematických chyb, které mohou způsobit chybu v úhrnu deště 3-30%. Zdrojem systematických chyb je vítr, smáčení ustalovacího válce, evaporace, rozstřík a mechanická funkce srážkoměru. Náhodné chyby jsou pak např. narušení elektronické či mechanické funkce srážkoměru, chyba přenosu dat, ucpání nálevky.[4]



Následující tabulka popisuje významy jednotlivých chyb.

Tab. 2 Zdroj, významnost a směr systematických chyb člunkových srážkoměrů. [4]

Zdroj	Význam	Směr působení
Vítr	0 - 30 %	Podhodnocení
Smáčení	2 - 10 %	Podhodnocení
Evaporace	0 - 4 %	Podhodnocení
Rozstřík	1 - 2 %	Nadhodnocení
Mechanická funkce	0 - 15 %	Podhodnocení

Princip funkce člunkového srážkoměru může způsobit chybu 10% v měření celkového úhrnu srážky. To je dáno potřebnou dobou k překlopení člunku. Pokud je intenzita deště vysoká, část vody natéká do nesprávné části člunku. S intenzitou deště tato chyba roste, jelikož doba k překlopení je prakticky neměnná.

### 3.1.3 Umístění a nastavení srážkoměrů

Dle (Suchánek [4,5], Starý [8]) je doporučeno se při volbě místa pro instalaci řídit následujícími body.

- Umístění srážkoměru je vhodné volit na poměrně malých prostranstvích obklopených vegetací nebo jinými objekty, které eliminují nepříznivý vliv větru.
- Kolem srážkoměru by měl být volný kónický prostor pod úhlem 45° od svislice a současně by neměl žádný objekt stát blíže než dvojnásobek jeho převýšení nad přístrojem.
- Výška srážkoměru nad terénem je pro podmínky České republiky stanovena na 1 m. To však lze v urbanizovaných oblastech poměrně těžko zajistit. Srovnatelných výsledků lze dosáhnout i při instalaci na nízké objekty do cca 3 m nad terénem.
- Není vhodné umisťovat srážkoměry v blízkosti silně zatížených komunikací a probíhajících staveb z důvodu otřesů.
- Není vhodné instalovat srážkoměry do oblastí s vysokým výskytem ptačí populace. Pokud je to nutné, doplnit ke srážkoměru odpuzovač ptáků, případně instalovat odsazenou doplňkovou korunku na horní obvodový plášť srážkoměru.
- Srážkoměry je také doporučeno instalovat na takovém místě, kde je minimální riziko vandalizmu nebo odcizení přístroje. [5,8]

V našem případě byla místa osazení srážkoměrů vybírána na základě těchto požadavků:

- zabezpečení proti krádeži a znehodnocení přístroje;

- vhodnost umístění vzhledem k srážko-odtokovému povodí;
- dostupnost.

Na základě těchto požadavků byla vybrána dvě vyhovující místa, kdy vzhledem k malé rozloze a malému rozptýlení povodí nehrál druhý rozhodovací bod přílišnou roli. Srážkoměr s označením „01 Starosta“ byl umístěn na oplocené zahradě, p.č. 1126/2, situované ve středu obce. Vzhledem k hmotnosti stojanu, nebylo nutné ke stabilizaci použití betonových dlaždic.



*Obr. 7 Umístění srážkoměru 01 Starosta.*

Srážkoměr s označením „02 Eko-Dvur“ byl umístěn na obecním pozemku v areálu sběrného dvora Lipůvka, p.č. 936/10. Aby bylo měření co možná nejméně ovlivněno okolními objekty, byl srážkoměr umístěn na střeše plechového kontejneru.



Obr. 8 Umístění srážkoměru 02 Eko-Dvůr

Na zvolených místech byly srážkoměry ustaveny do roviny pomocí integrované libely a nastaveny. Tím je myšleno pojmenování srážkoměru, nastavení časového kroku zápisu dat a formátu těchto dat. Časový krok byl nastaven na 1 minutu. Formátem je myšlen počet překlopení člunku nebo jakýkoliv přepočet této hodnoty. Lze tedy nastavit, aby výstupem byla rovnou hodnota úhrnu. Tato možnost však z důvodu pozdější práce s daty nebyla zvolena. Výstupem tedy byla data ve formátu *počet překlopení za 1 minutu*. Při používání online dataloggerů byl „balíček“ těchto minutových dat posílán na server jednou denně, vždy v 05:00 SELČ.

Srážkoměry byly od sebe vzdáleny vzdušnou čarou přibližně 770 metrů, rozdíl nadmořských výšek činil přibližně 22 metrů. V průběhu měrné kampaně byly srážkoměry navštěvovány nejen při zjištění výpadku měření. Pravidelné návštěvy byly prováděny s intervaly 2-3 týdny.

## 3.2 PRŮTOKOMĚR

### 3.2.1 Obecně k měření průtoků ve stokové síti

Ke stanovení průtoků ve stokových sítích se využívají měřidla fungující na více principech. Je vhodné, uvést si zde alespoň ta základní, nejčastěji používaná:

- Objemová metoda – dá se označit za nejjednodušší způsob měření průtoků. Průtok je stanoven na základě měření času potřebného k naplnění nádoby určitého objemu.
- Hydrometrická metoda – založena na měření bodových rychlostí v určitých místech průtočného profilu a stanovení tvaru a rozměrů tohoto profilu. Rychlosti se měří v řadě svislic. Na každé svislici je měřena rychlost ve více bodech, které se zprůměrují za vzniku svislicové rychlosti. Předpokládá se, že svislicová rychlost platí pro svislý pás průtočné plochy, kdy jejich šířka vyplývá z množství svislic. Za předpokladu, že průtok v průběhu měření zůstává konstantní, můžeme stanovit celkový průtok jako součet průtoků v dílčích pásech. Měření bodových rychlostí se provádí hydrometrickou vrtulí. Rychlost se stanoví na základě počtu otáček vrtule (propeleru) za daný časový interval.
- Q-h křivka – vyjadřuje funkční závislost průtoků na hloubce. Z několika měření (např. hydrometrování) stanovíme tyto veličiny a zhotovíme křivku vyjadřující jejich závislost. Dále je už měřena pouze hloubka (výška hladiny) a průtok je odvozován z křivky. Metoda je většinou používána jako náhradní, pokud není možné použít jiný způsob. Možnosti přesného stanovení křivky jsou totiž omezené (malý rozsah průtoků při měření, v intervalu nutném pro měření nekonstantní průtok atd.).
- Měření pomocí měrných přelivů a žlabů – tato metoda vyžaduje složitější instalaci ve stokové síti. Při použití přelivů (nejčastěji obdélníkový Ponceletův a trojúhelníkový Thomsonův) je měřena výška hladiny, průtok je funkcí přepadové výšky. Měření pomocí žlabů je založeno na hydraulickém jevu, kdy dochází k přechodu podkritického (říčního) režimu proudění přes kritickou hloubku na nadkritický (bystřinný) režim. Opět je zde měřena výška hladiny, výpočet průtoků vychází z Bernoulliho rovnice. Hloubka vody se nejčastěji stanovuje pomocí snímačů hladiny, které mohou být ultrazvukové, tlakové apod.
- Ultrazvukové – pracující na Dopplerově principu měří dvě průřezové charakteristiky vodního proudu, a to rychlost a hloubku. Průtok je pak stanoven vynásobením průtočné plochy a střední průřezové rychlosti proudu. Ultrazvukové neboli Dopplerovy/pracující na Dopplerově principu vyhodnocují změnu frekvence ultrazvukové vlny odražené od nehomogenit (pevné částice, bubliny, unášených proudem tekutiny. Podrobnější popis viz dále. [14,15]

Je zřejmé, že ne každá metoda je vhodná pro účely kalibrace a verifikace simulačního modelu. Nezbytným požadavkem je kontinuita měření, což z výše uvedených metod splňují pouze dvě poslední. Nejčastěji se pro krátkodobé monitorings využívají průtokoměry ultrazvukové. Jejich výhodou je menší náročnost na stavební úpravy při osazování, vyšší variabilita volby měrného profilu a zachování průtočné plochy bez překážek.

Měření pomocí přelivů a žlabů je vhodné pro instalaci do profilů, kde se vyskytuje malé množství vody a technické omezení ultrazvukových průtokoměrů nedovoluje jejich použití. Vždy se volí nejlepší metoda měření s ohledem na hydraulické, technické a provozní požadavky. Přelivy a žlaby mají obecně nízké nároky na údržbu a širokou použitelnost, avšak musí být osazeny tam, kde je možno zabezpečit vhodné statické a hydraulické propojení kanálu a koryta se žlabem. Jelikož bývají osazeny dlouhodobě, běžně se místa osazení stavebně upravují, aby vyhovovaly těmto podmínkám.

Následující tabulka srovnává typy měřidel dle více parametrů.

*Tab. 3 Metody měření průtoků. [11]*

Typ měření	Typ odpadní vody	Jednoduchost výstavby	Jednoduchost kalibrace a kontroly funkce	Ztráta spádu	Nejistota měření
měrné přelivy	mechanicky předčištěná	ne (stavební úpravy)	ano	vysoká	2-6 %
měrné žlaby	surová odpadní	ne (stavební úpravy)	ano	nízká	3-7 %
Q-h křivka	surová odpadní	ano	ne	žádná	10-20 %
ultrazvuková metoda (Dopplerův efekt)	surová odpadní	ano	ne	žádná	5-25 %

### 3.2.2 Použitý ultrazvukový průtokoměr Sigma 950

K měření průtoku odpadních vod byl v měrné kampani využíván průtokoměr Sigma 950, vyrobený společností Hach.



Obr. 9 Průtokoměr Sigma 950

Jak můžeme vidět na obrázku č. 9, k přístroji je možné připojit více druhů sond, což znamená, že přístroj dokáže zaznamenávat současně nebo jednotlivě více vstupů. Jedná se tedy o přístroj umožňující měření a záznam:

- průtoku;
- výšky hladiny;
- pH;
- vodivosti;
- teploty;
- srážek;
- další vstupy (modem, výstražné zařízení,...) [17]

Jelikož se předpokládá umístění přístroje v agresivních podmínkách panujících v kanalizačních šachtách, je vodotěsné šasi vyrobeno z odolného technického termoplastu. Ostatní materiály jsou korozivzdorné. Přední panel (tlačítka a display) je opatřen průhledným uzamykatelným plastovým krytem. Po stranách jsou rozmístěny konektory pro přenos dat, připojení vstupů a čidel a připojení zdroje elektrické energie. Ty jsou rovněž vodotěsně zavíčkované. Na pravé straně se nachází port sání vzduchu a referenční port



tlaku. Napájení přístroje může být prováděno buďto baterií (12 V<sub>ss</sub>) umístěnou na zadní straně, nebo ze sítě (přes transformátor 110 V<sub>st</sub>).

### 3.2.3 Princip měření průtoku

Průtokoměr funguje na principu měření výšky hladiny a rychlosti. Obě veličiny jsou měřeny jednou sondou.

Výška hladiny je měřena tak, že je sondou proháněno malé množství vzduchu, který je pomalu vypouštěn za vzniku bublinek. Tlak působící proti bublajícímu vzduchu je přímo úměrný vodnímu sloupci působícího na sondu. K přepočtu tlaku na výšku je souběžně využíván referenční port na pravé straně průtokoměru, kterým je zjišťován okolní tlak. Snímač nejprve odečte tlak v hadičce vyvíječe bublinek a pak ho porovná s okolním atmosférickým tlakem. Jejich rozdíl je následně převeden na číslo, které reprezentuje výšku hladiny nad čidlem.

Rychlost proudící vody je měřena na základě *Dopplerova jevu*. Ten popisuje zdánlivou změnu frekvence vlnění (např. zvuk, světlo), která se projeví, jestliže se zdroj vlnění a pozorovatel vůči sobě relativně vzájemně pohybují. Frekvence se zvyšuje, když se zdroj a pozorovatel k sobě blíží a naopak snižuje, jestliže se vzdalují. [17]

*„Nejčastěji užívaným příkladem tohoto jevu je změna výšky tónů vydávaných sirénou na vozidle projíždějícím okolo pozorovatele. Pokud se k vám houkající auto blíží, zaznamenáváte vyšší frekvenci a tedy kratší vlnovou délku. Vzdalují-li se zdroj a pozorovatel od sebe, pozorovatel zaznamenává nižší frekvenci a tedy vyšší vlnovou délku.“* [19]

Při měření výšky hladiny sonda současně měří rychlost proudění. Ultrazvukové vlny jsou vysílány do toku a odráží se od částecek unášených proudem. Změna frekvence (vyslaných a odražených) vln je přímo úměrná rychlosti částic a je využita k výpočtu rychlosti proudu. [17]

Průtok je pak vypočítán vynásobením rychlosti a průtočné plochy (stanovené ze změřené výšky vody).

$$Q = v \times A \quad (3.1)$$

Kde	$Q$	...	průtok [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ],
	$v$	...	střední průřezová rychlost proudu [m·s <sup>-1</sup> ],
	$A$	...	průtočná plocha [m <sup>2</sup> ].

### 3.2.4 Kalibrace průtokoměru

Průtokoměr obsahuje program pro kalibraci měření výšky hladiny (proublávače), teploty i pH. V našem případě bylo pro měření použito, zvyše uvedených, pouze měření výšky hladiny. Kalibraci, společně s výměnou článků baterií, provedla firma

Aquateam s.r.o. přibližně dva měsíce před osazením průtokoměru. Kalibrace čidla rychlosti není dle výrobce vyžadována.

Průtokoměr byl ještě před osazením ve stokové síti „odzkoušen“ v měrném žlabu na Ústavu vodních staveb (VST), FAST VUT. Cílem bylo vyzkoušet si nastavení průtokoměru pro reálnou situaci, vyzkoušet online propojení s PC a stahování naměřených dat. Důležité bylo také zjistit, zda je průtokoměr schopen měřit bez výrazných nepřesností, překračujících očekávané hodnoty. Kontrolována byla jak přesnost měření výšky hladiny, tak čidla rychlosti. Měření výšky hladiny bylo velmi přesné, s milimetrovými odchylkami do 1%. Přesnost čidla rychlosti byla porovnávána přes průtok ve žlabu. Odchyšky se pohybovaly v rozmezí 5-15 %. Přínosem tohoto odzkoušení bylo podstatně rychlejší osazení ve stokové síti bez ztráty dat z důvodu chybného počínání při nastavování.

### 3.2.5 Umístění průtokoměru

Výběr vhodného místa k osazení průtokoměru by se měl, stejně jako u srážkoměrů, řídit určitými body. Toto místo by mělo vyhovovat určitým podmínkám, které si předem stanovíme. Podmínky si s sebou nese v první řadě sám průtokoměr – jeho princip měření. Tím je myšleno hydraulicky vhodné umístění neovlivňující přesnost měření. Mezi další podmínky může patřit bezpečnost, vhodnost místa vzhledem k srážko-odtokovému povodí, možnost stavebních úprav. Výrobce tedy udává požadavky na umístění přístroje zejména vzhledem k zajištění co nejpřesnějšího měření průtoku. Na tvůrci modelu je pak vybrat místo, ze kterého budou naměřená data vhodná pro kalibraci a verifikaci simulačního modelu.

Výrobce použitého ultrazvukového průtokoměru doporučuje výběr místa bez turbulencí, které znemožňují určení průměrné rychlosti toku. Ty bývají způsobeny:

- výtokem z potrubí – sondu je vhodné umístit ve vzdálenosti 5 krát větší než je očekávaná hloubka vody protiproudě od vyústění;
- vertikální a horizontální změnou v profilu dna – opět v 5-ti násobné vzdálenosti výšky vody od této změny protiproudě, popřípadě 10-ti násobné vzdálenosti poproudě.

V našem případě bylo při výběru navíc přihlíženo k:

- bezpečnosti – aby se v místě nevyskytovaly škodlivé plyny, šachta se nenacházela v komunikaci;
- technickému stavu šachty;
- zabezpečení proti krádeži a znehodnocení přístroje;
- vhodnosti umístění vzhledem k srážko-odtokovému povodí;
- dostupnosti.



Na základě těchto podmínek byla z předem vytipovaných šachet vybrána optimální. Předem byly na stokové síti, na základě projektové dokumentace, vytipovány 3 šachty a jedna spojná komora v jihozápadní části obce, všechny na stoce „A“.

První z nich byla šachta Š4 (uzel A\_U5 viz příloha 01). Ta se nachází v parku u kostela sv. Cecílie. Jedná se o lomovou šachtu, kterou prochází železobetonové potrubí DN 1000. Vzhledem k technickému stavu šachty (chybějící stupadla) byla tato možnost zamítnuta.

Druhou možností byla spojná šachta Š2 (uzel A\_U3) poproudě od šachty Š4, kterou rovněž prochází potrubí ŽB DN 1000. Šachta nebyla nalezena, místo, kde by se měla šachta nacházet je hustě zarostlé křovinami a stromky. Kvůli této skutečnosti se uvažovalo o náhradě šachtou Š3 (uzel A\_U4), která je první protiproudě od Š4. Šachta Š3 byla nalezena, avšak kvůli technickému stavu, viz následující obrázek, také zamítnuta.



*Obr. 10 Šachta Š3.*

Třetí možností byla nově vybudovaná spojná komora SP1, která se nachází poproudě od výše jmenovaných, před vírovým separátorem odpadních vod. Tato komora byla vybudována v roce 2015 za účelem spojit potrubí ŽB DN 1000 a nově budovanou stoku ŽB DN 600 odvádějící OV z jižní části obce. Při výstavbě bylo, dle provozovatel stokové sítě, „vzhledem k technickému stavu stávající železobetonové potrubí DN 1000 sanováno vložkou v délce 15 metrů protiproudě“. Dle projektové dokumentace (dále PD) má mít sanované potrubí kruhový průřez o průměru 950 mm. Ve skutečnosti však došlo ke zploštění průřezu v horizontálním směru. Průřez je tedy eliptický

o rozměrech 1060 x 860 mm (š x v). Spojnou komoru SP1 (uzel A\_U2) můžeme vidět na následujícím obrázku.



*Obr. 11 Spojná komora SP1.*

Jak můžeme vidět na předchozím obrázku, komora leží v blízkosti vírového separátoru OV. Předpokládalo se tedy, že za vydatnějších srážek může být měření průtoku ovlivněno zpětným vzduťím vody ze separátoru do měrného profilu. Výškový rozdíl mezi vtokem do separátoru a sondou byl stanoven jako 1,2 m. Přelivná hrana separátoru je však o 1,02 m výše než sonda. I přesto byla spojná komora SP1 označena za nejvhodnější místo k osazení průtokoměru. Vyhovovala totiž jako jediná stanoveným požadavkům.

### **3.2.6 Osazení a nastavení průtokoměru**

Na vybraném místě, tedy spojná komora SP1 (uzel A\_U2), bylo přistoupeno k osazení průtokoměru. Osazení znamená umístění sondy do vhodného místa v potrubí a umístění jednotky (skřínky) průtokoměru do kanalizační šachty.

Vzhledem k tomu, že na straně jednotky jsou porty sání vzduchu, vyžaduje se, aby byla umístěna v takové výšce, do které nemůže nastoupat hladina vody. Pokud by hrozilo zatopení jednotky, k portům sání je možné připevnit hadičky vyvedené do bezpečné výšky.

Co se týče umístění sondy vzhledem k šachtě, je umožněna instalace jak do potrubí přívodního (sonda protiproudě), tak do potrubí odvádějícího vodu ze šachty (sonda poproudě). Běžně se volí a je doporučována první možnost, tedy umístit sondu do potrubí

přivádějícího vodu do šachty. Sonda pak ke zjištění rychlosti vydává ultrazvukové vlny proti proudu vody. Jak již bylo zmíněno, sonda by měla být umístěna v místě, kde nepředpokládáme vznik turbulencí proudu. Je tedy dále doporučeno:

- v místě měření neinstalovat více než jednu sondu z důvodu vzniku turbulencí, zrychlení proudění a „přeslechů“ mezi nimi;
- umístit v měrném průřezu sondu co nejnižší;
- neinstalovat sondu u výtoku do šachty, nejlépe je umístit ji do vzdálenosti 3 – 5 krát větší než je průměr potrubí;
- vyvarovat se míst, které obsahují překážky či výusti do potrubí (např. domovní přípojky) ve vzdálenosti 2 – 4 krát průměr potrubí;
- vyvarovat se míst s pomalým prouděním vody, kde by mohly vznikat usazeniny kolem sondy;
- vyvarovat se míst s velmi vysokou rychlostí proudu, kde může být montáž nebezpečná. [17]

V našem případě bylo rozhodnuto umístit sondu do vzdálenosti cca 4 metry protiproudě od SP1.

Před samotnou instalací bylo provedeno nastavení pomocí klávesnice a displeje průtokoměru. To zahrnovalo nastavení:

- času a data – musí být synchronní se srážkoměry;
- typu měření – výška hladiny a rychlost protiproudě;
- průřez a rozměru potrubí;
- veškerých jednotek veličin – výška (cm), rychlost ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), aktuální průtok ( $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ), celkové protečené množství ( $\text{m}^3$ );
- rychlosti probublávání (1 bublina za vteřinu);
- zapisovacího intervalu (1 minuta);
- typu paměti (přepisovatelná).

Poslední dva body se týkají nastavení integrovaného dataloggeru. Interval zápisu dat volíme dle požadavků. Pro naše potřeby je nejvhodnější znát data v každé minutě. Toto nastavení znamená, že průtokoměr měří rychlost a výšku přibližně každou sekundu a tyto hodnoty zprůměruje do minutového formátu. Toto časové rozlišení je opět náročné na paměť dataloggeru. Instalovaná velikost paměti je 128 kB, což znamená zaplnění paměti za 7 dní.

Následně se sonda připevnila k nerezovému plátu, který pak byl roztažen do potrubí a připevněn. Kabel vedoucí k sondě byl připevněn pomocí eska pásek k plátu, který má v jedné své polovině k tomuto účelu předvrtané otvory. Kabel byl pak ještě páskou



(„duck tape“) přichycen, aby nezachytával plovoucí předměty a nebylo tak ovlivněno měření, viz následující obrázek.



*Obr. 12 Připevnění kabelu sondy průtokoměru.*

Poté byl plát se sondou spuštěn do komory. Na určeném místě v potrubí byl pak plát připevněn pomocí hmoždinek a vrutů, tak aby ho proud vody při dešti nevytrhl a nedošlo k poškození přístroje. Sondy se někdy osazují do potrubí na plátech, které se upevňují v potrubí rozepřením, bez nutnosti vrtání. Tento systém však nebyl k dispozici a navíc by jej nebylo možné v tomto případě použít. Potrubí totiž nemá kruhový průřez a sanační vložka nepřiléhá dokonale za tvorby vypuklin. Nainstalovaný plát se sondou v potrubí můžeme vidět na následujícím obrázku.



*Obr. 13 Připevněný plát se sondou v potrubí.*

Kabel vedoucí od sondy k jednotce průtokoměru byl napnut a připevněn ke stupadlům v komoře. Po osazení byla zjištěna funkčnost měření a přenosu dat do jednotky průtokoměru a provedena kontrola nastavení průtokoměru a dataloggeru. Po spuštění měření byla jednotka zavěšena na stupadlo pomocí závěsného systému a zajištěna zámkem. Výškově byla jednotka cca 3 metry nad přelivnou hranou (teoreticky nejvyšší možnou hladinou vody v separátoru), což znamenalo bezpečné umístění pro porty sání vzduchu. Na obrázku č. 14 můžeme vidět skříň průtokoměru se závěsným systémem při kontrole nastavení. Na obrázku č. 15 je vidět umístěná měřicí jednotka ve spojně komoře SP1.



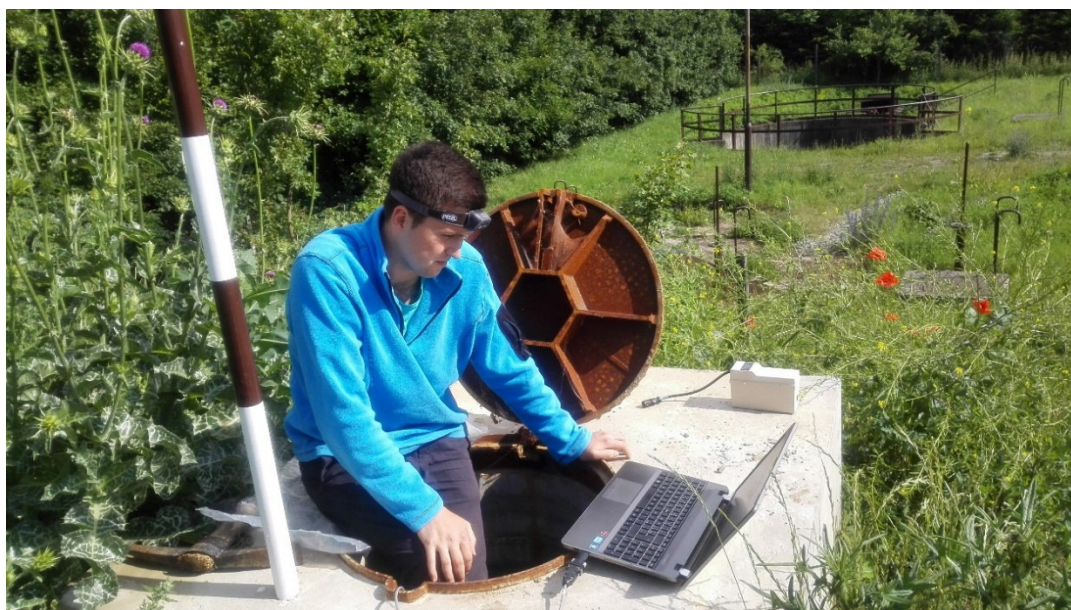
*Obr. 14    Kontrola nastavení průtokoměru při osazování.*





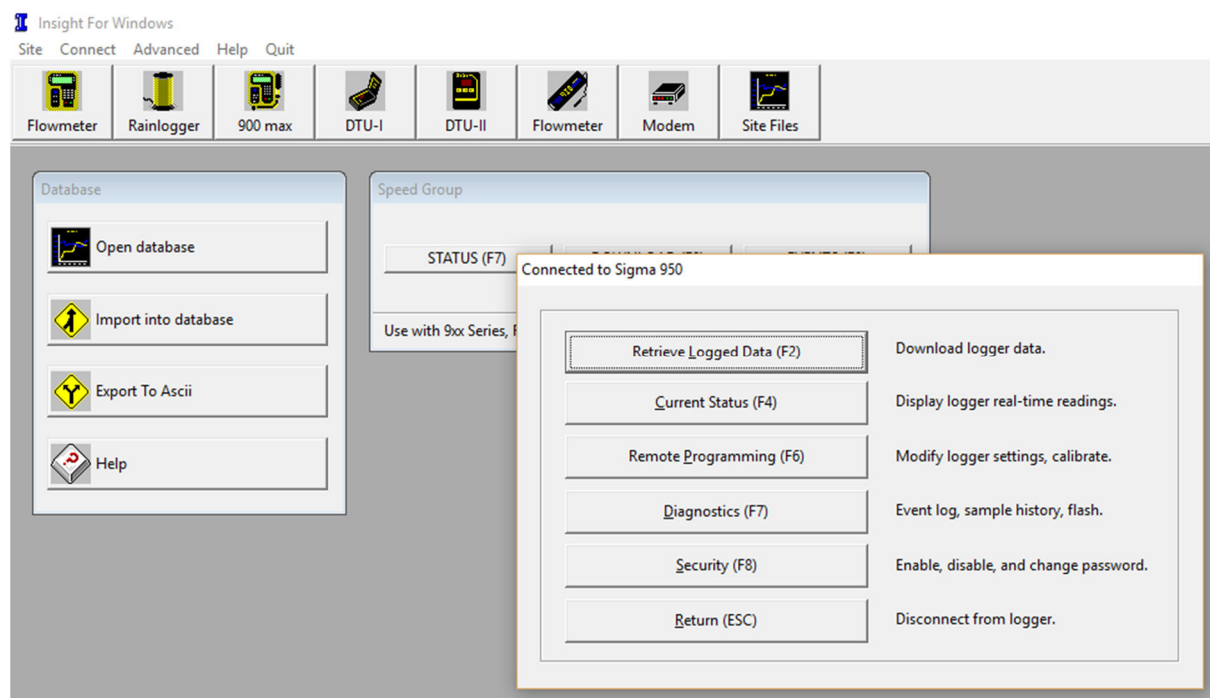
*Obr. 15 Zavěšená jednotka průtokoměru.*

V průběhu měrné kampaně byl průtokoměr navštěvován 1 krát týdně. Jak již totiž bylo zmíněno, paměť dataloggeru byla vyčerpána za 7 dní. I kdyby však byla paměť loggeru větší, průtokoměr vyžaduje častější obsluhu. Neobsahoval totiž modem k dálkovému přenosu dat, takže bylo vhodné častěji kontrolovat sondu. Třetím úkonem prováděným při návštěvách byla výměna baterie průtokoměru. Ta měla kapacitu udržet průtokoměr v chodu cca 10 dní, byla tedy měněna také jednou týdně. Měněnou baterii a propojení průtokoměru s PC můžeme vidět na následujícím obrázku.



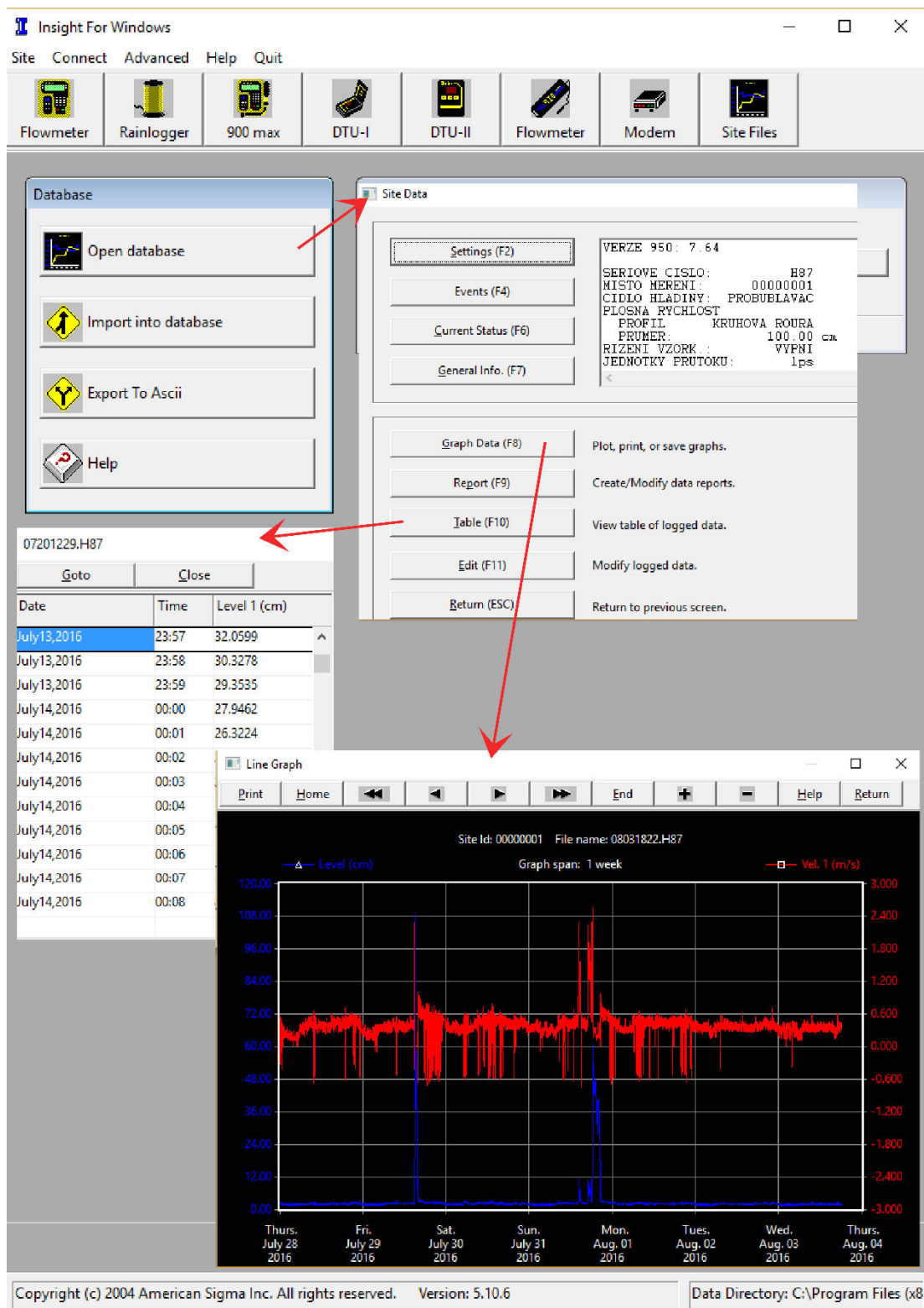
*Obr. 16 Stahování dat průtokoměru.*

Komunikace mezi počítačem a průtokoměrem probíhala přes software *Insight*, propojení pomocí kabelu s koncovkou RS 232. Jelikož se tento konektor v dnešních počítačích nenachází, byla použita redukce na USB. Okno, které se zobrazí po propojení PC s průtokoměrem, můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 17 Průtokoměr – okno připojení.

Pokud je průtokoměr připojen k PC objeví se okno na obrázku v popředí. Je tedy možno stahovat naměřená data, podívat se na současný stav měření, měnit některá nastavení, provést diagnostiku problémů či zabezpečit průtokoměr heslem proti neoprávněnému přístupu. Stažená data se vždy ukládají do databáze – a pokud to požadujeme – i do textového souboru. Do databáze je možné samozřejmě nahlížet, i když není průtokoměr připojen k PC. Z ní je pak možné exportovat jednotlivé události, zobrazovat tabulky s daty či grafy viz následující obrázek.



Obr. 18 Prostředí programu Insight.



### 3.3 VÝSTUPY Z MĚRNÉ KAMPANĚ

Měrná kampaň v obci Lipůvka byla kompletně započata 13. 6. 2016, kdy byl osazen průtokoměr. Osazení srážkoměrů proběhlo dříve, přesně 27. 5. 2016. Ukončena byla 15. 9. 2016, kdy byly všechny měřicí přístroje demontovány. Vhodné výstupy byly z měrné kampaně získávány po přibližně třech týdnech od započetí, kdy se u srážkoměrů „ladilo“ nastavení dataloggerů a lokálně měnila jejich poloha na stanovištích. Za dobu trvání měrné kampaně bylo provedeno 19 návštěv lokality a měřicích přístrojů. Většinou se jednalo o pravidelné kontroly a obsluhu průtokoměru. V některých případech se jednalo o operativní návštěvy srážkoměrů.

#### 3.3.1 Srážková data

Surová data z měření provedeného pomocí člunkových srážkoměrů, většinou není možné použít přímo ke kalibraci či verifikaci. Data je nejprve nutno validovat neboli zpracovat do podoby, kdy neobsahují chyby. Chyby se mohou vyskytovat ve formě:

- Ztráty dat způsobené vadou komunikace mezi srážkoměrem a dataloggerem, nebo dataloggerem a sítí (GSM, GPRS).
- Ztráty dat nebo zkreslení dat zanesením srážkoměru či jinou mechanickou poruchou.

Pokud dojde k úplnému zanesení nálevky, srážkoměr se začne plnit vodou a ve výstupech nebude zaznamenáno žádné překlopení člunku. Pokud však dojde k částečnému zanesení nálevky, bude jí voda částečně protékat, což ve výstupech způsobí delší dobu trvání deště o menší intenzitě a následné pulsy charakteristické typickým „prokapáváním“.

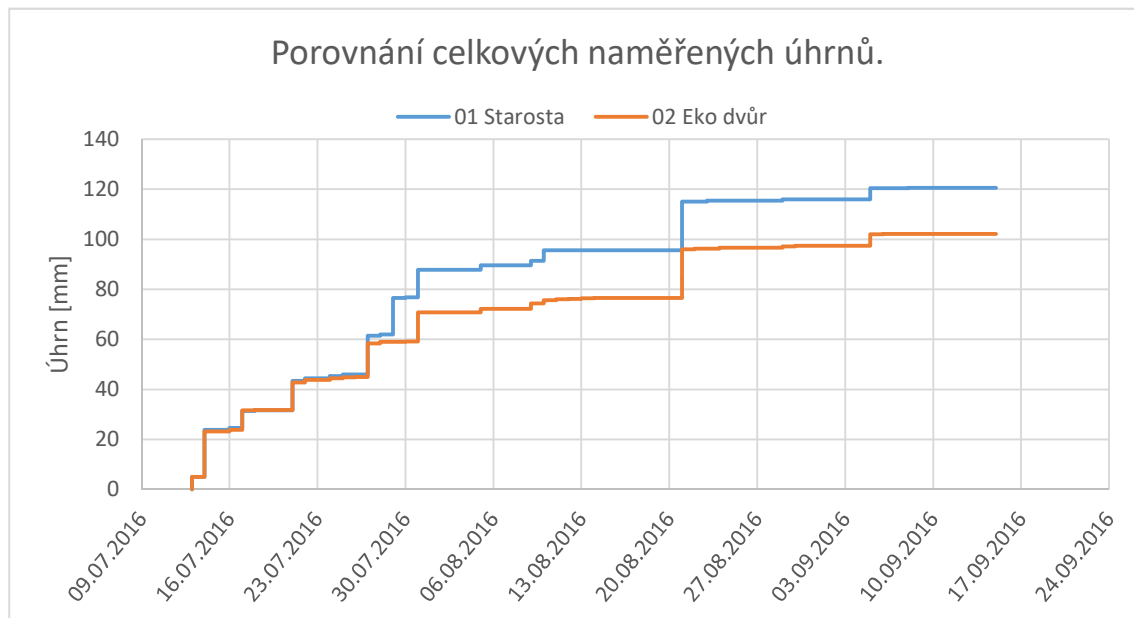
- Zkreslením dat z důvodu objemu nutného k překlopení člunku.

Tímto je myšleno to, že se nedá přesně určit, za jakou dobu došlo k prvnímu naplnění člunku na začátku srážky a jaký objem zůstal ve člunku na konci srážky, kdy nedošlo k jeho překlopení. Tento zbylý objem může následně ovlivnit další vyhodnocovanou srážku, pokud nedojde k jeho vypaření. [10, 4]

Zaznamenány mohou být i „falešná“ překlopení při čištění či manipulaci se srážkoměrem. Proto je důležité si zaznamenat data a časy těchto manipulací pro pozdější validaci dat.

## Naměřená data

Za dobu měrné kampaně byl naměřen na srážkoměru *01 Starosta* celkový úhrn 120,6 mm, na srážkoměru *02 Eko dvůr* 102,2 mm. Největší podíl na tomto rozdílu nese výpadek v zaznamenávání dat srážkoměru *02 Eko dvůr* dne 29. a 30. 7.

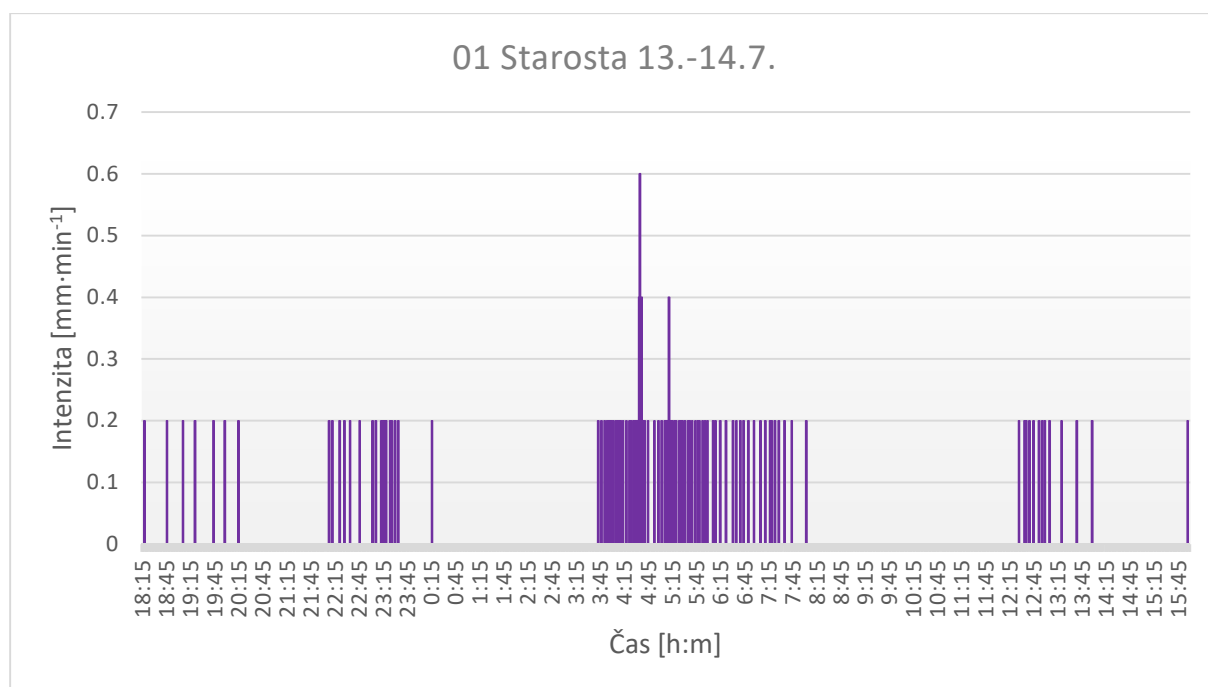


Obr. 19 Naměřené dešťové úhrny za dobu měrné kampaně.

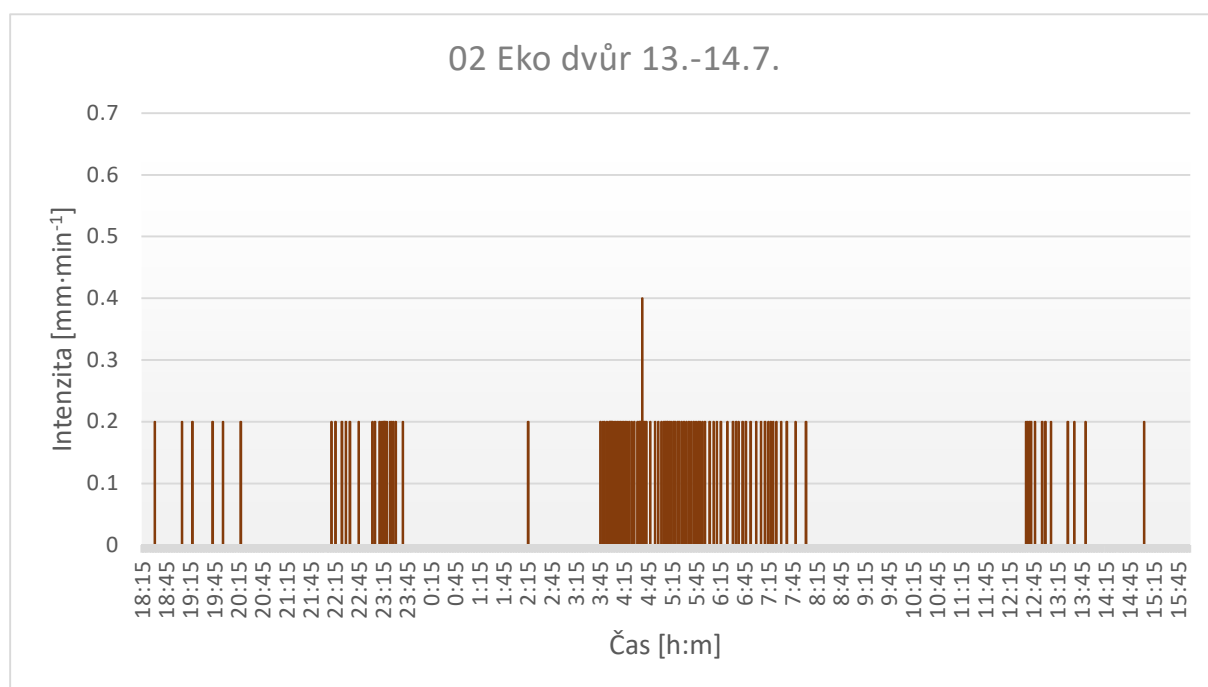
Vyhodnocení dešťových dat pro jejich další použití, při kalibraci a verifikaci, probíhalo následovně. Z celkového počtu dešťových epizod (událostí) bylo nutné vybrat ty, které způsobily vhodnou (dostatečně velkou) odezvu ve stokové síti. Byly vybírány takové události, při kterých stoupla výška hladiny v měrném profilu nad 10 cm. Při bezdeštném průtoku se pohybovala výška hladiny v měrném profilu okolo dvou centimetrů. Celkem bylo vybráno následujících 7 dešťových událostí. Grafy znázorňují úhrny v jednotlivých minutách.

### 1. Událost 13.7.- 14.7.

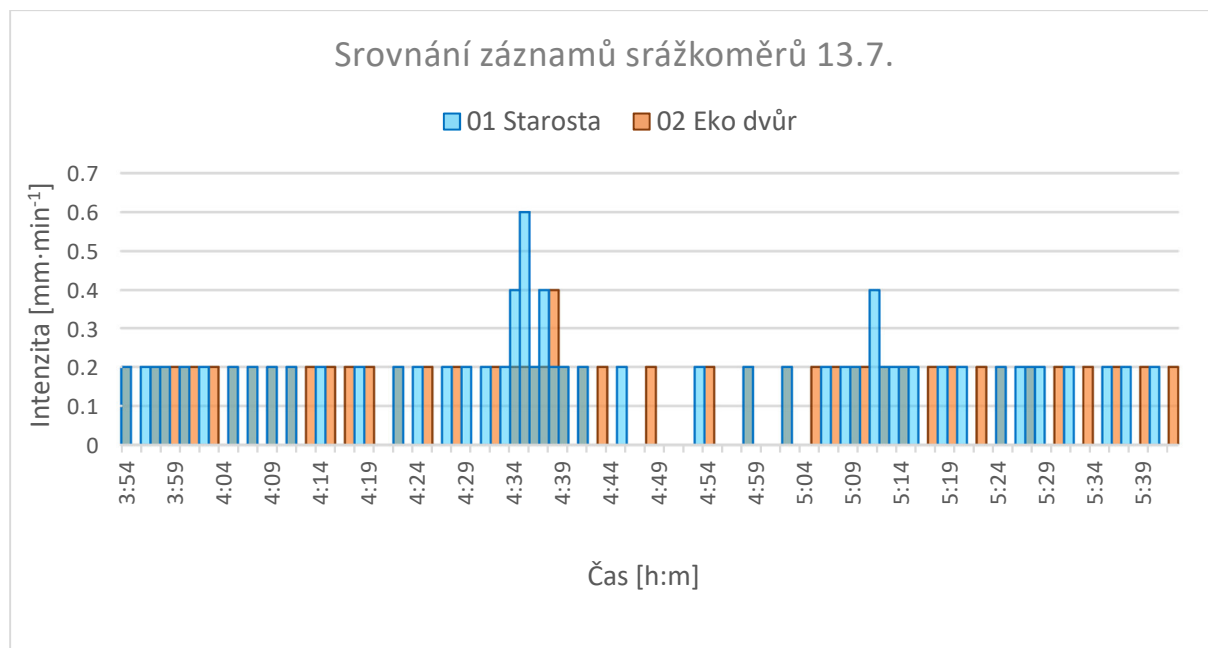
První vyhodnocená událost probíhala mezi 18:00 dne 13.7. a 14:00 dne 14.7.2016. Záznamy obou srážkoměrů můžeme vidět na obrázku č. 20 a 21. Obrázek č. 22 pak znázorňuje porovnání obou srážkoměrů při průběhu deště s nejvyšší intenzitou. Úhrn za celou dobu trvání deště naměřený srážkoměrem *01 Starosta* činil 23,8 mm, srážkoměr *02 Eko dvůr* zaznamenal o 3 překlopení méně, tedy 23,2 mm.



*Obr. 20 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 13. - 14.7.*



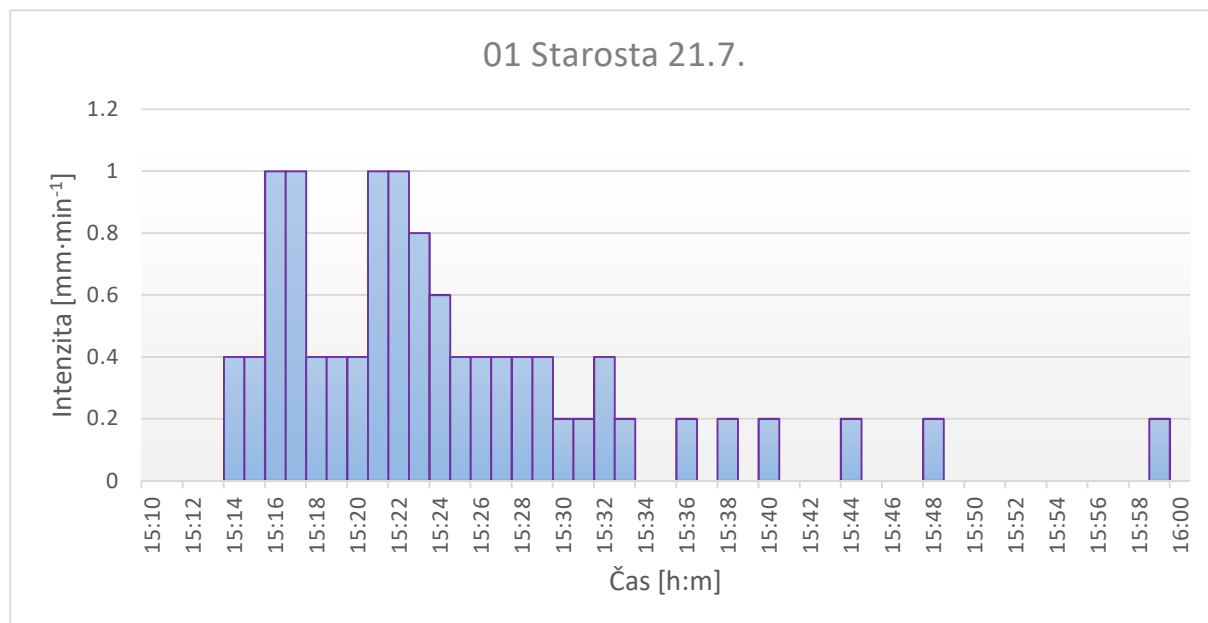
*Obr. 21 Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 13. - 14.7.*



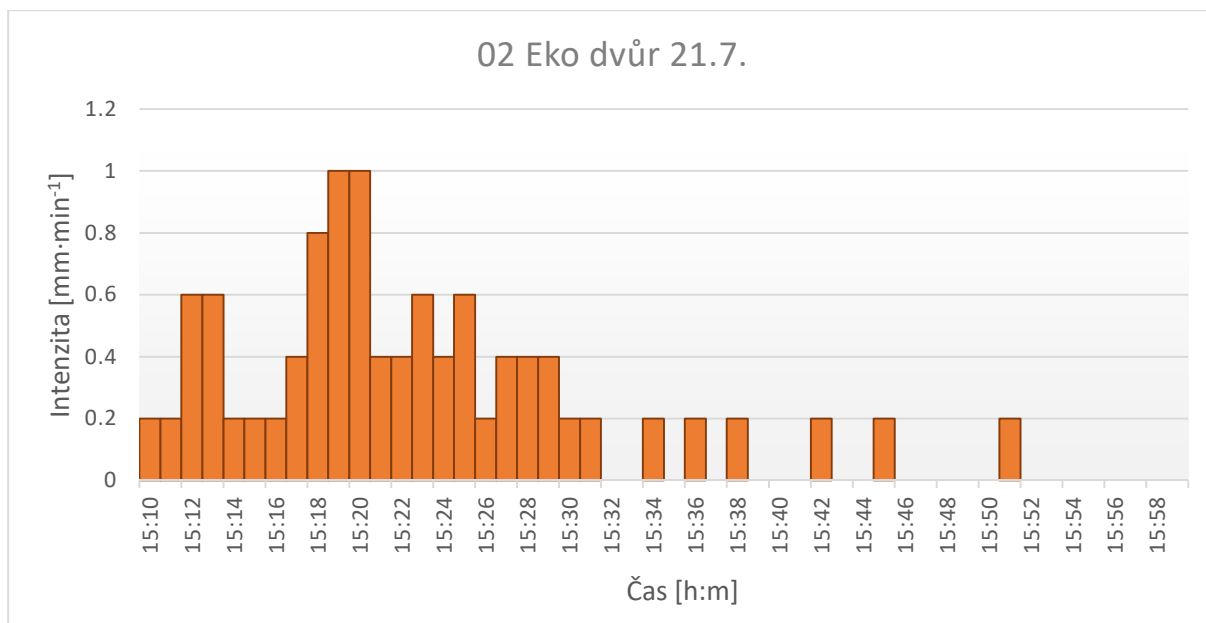
Obr. 22 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 13. - 14.7.

## 2. Událost 21.7.

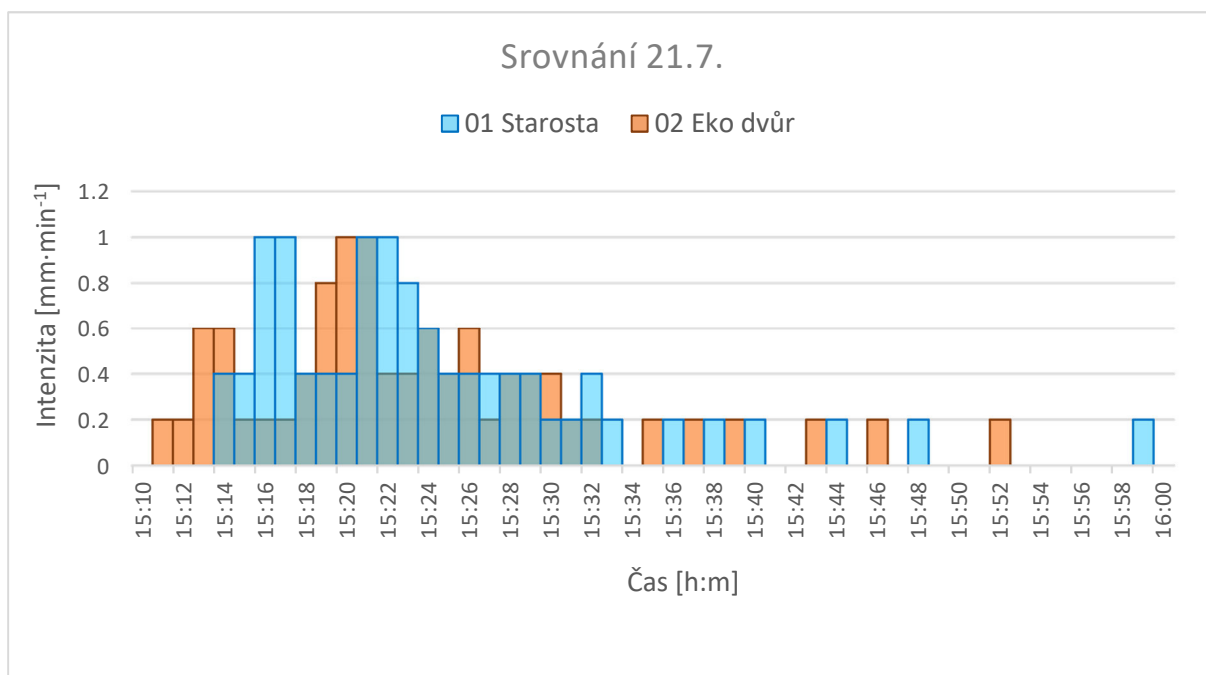
Druhá vhodná událost probíhala 21.7. od 15:00 po dobu jedné hodiny. Na obrázku číslo 23 můžeme vidět záznam deště ze srážkoměru 01, kdy byl změřen celkový úhrn 11,6 mm. Na obrázku číslo 24 můžeme vidět zaznamenaný průběh deště srážkoměrem 02, kdy byl změřen celkový úhrn 10,8 mm. Obrázek číslo 25 obsahuje porovnání záznamů z obou srážkoměrů.



Obr. 23 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 21.7.



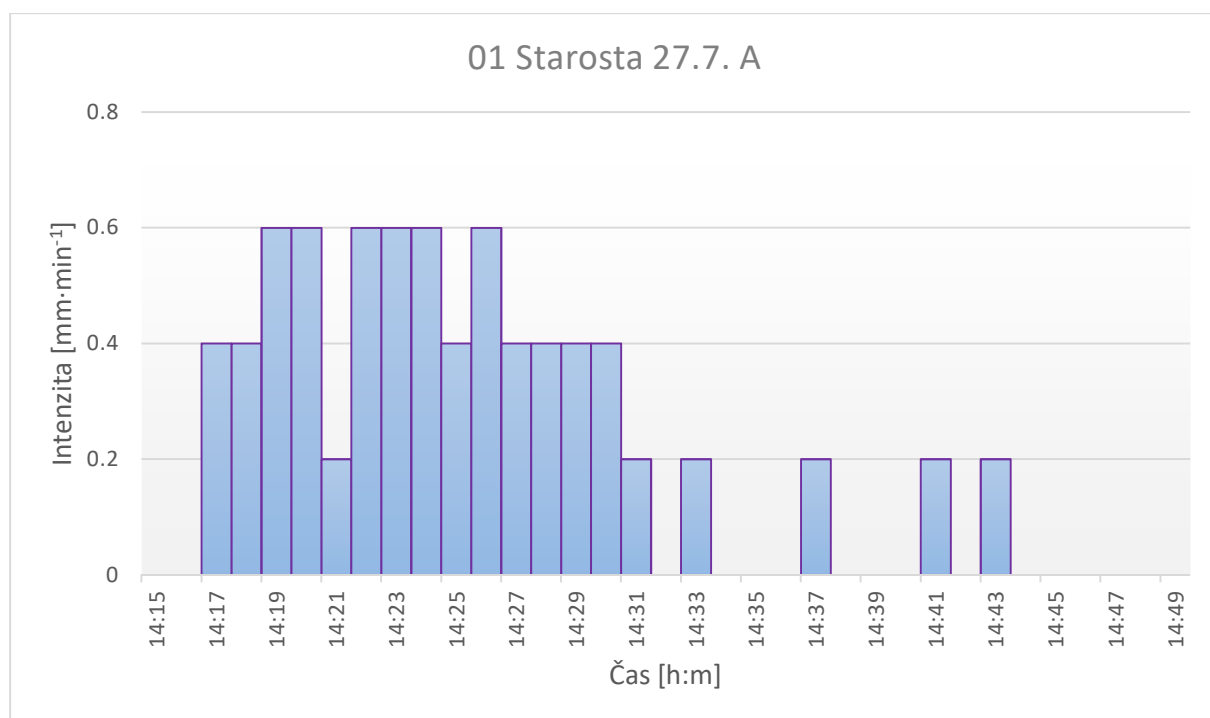
Obr. 24 Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 21.7.



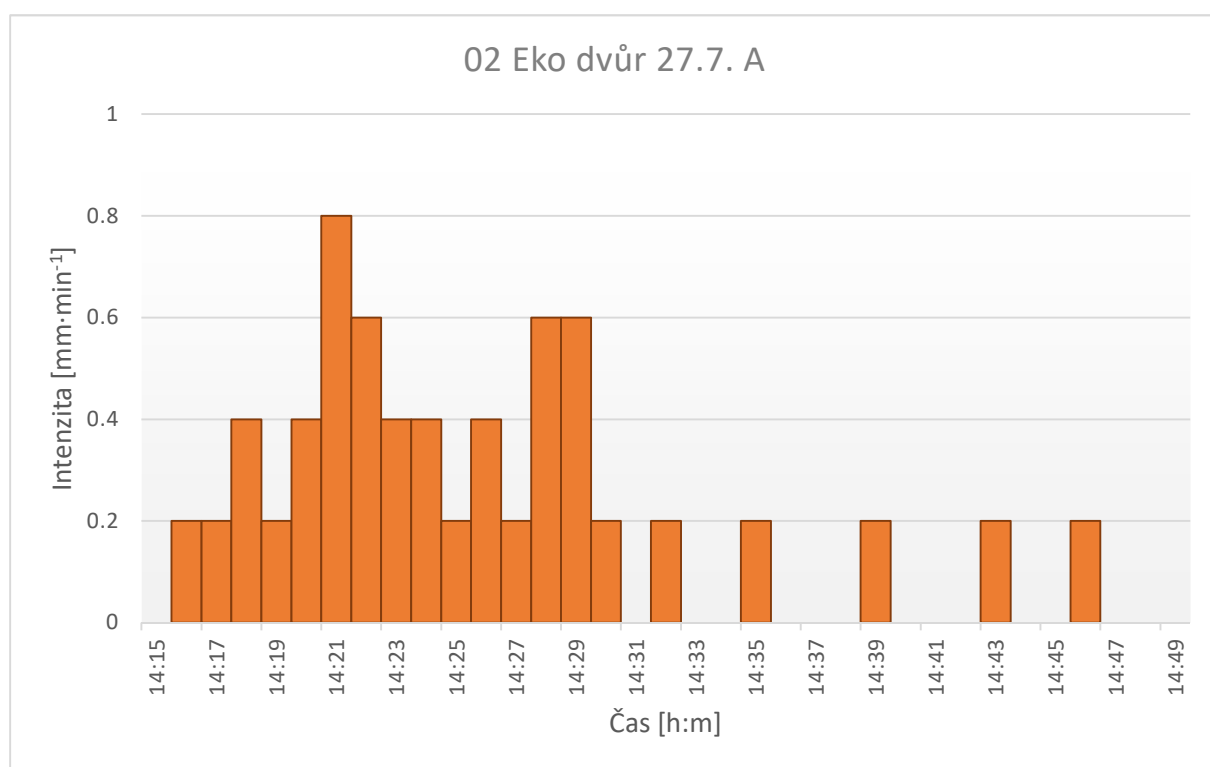
Obr. 25 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 21.7.

### 3. Událost 27.7.

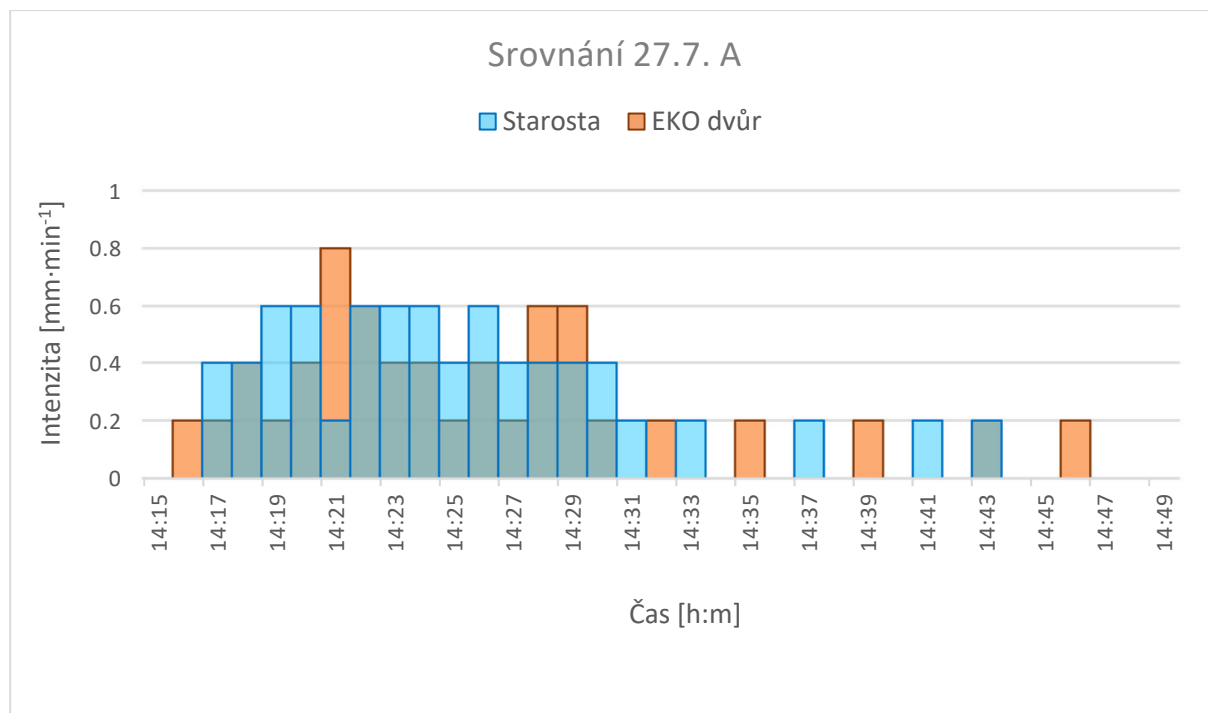
Třetí vhodná událost probíhala 27.7. přibližně od 14:00 do 16:45. Událost byla složena ze dvou dešťů s hodinovým rozestupem. Událost je tedy pro přehlednost rozdělena na dešť „A“ a dešť „B“. Na obrázku číslo 26 můžeme vidět záznam deště A srážkoměru 01 (celkový úhrn 7,6 mm), na obrázku číslo 27 záznam srážkoměru 02 (celkový úhrn 6,8mm). Jejich srovnání viz obrázek číslo 28.



*Obr. 26 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 27.7. A.*

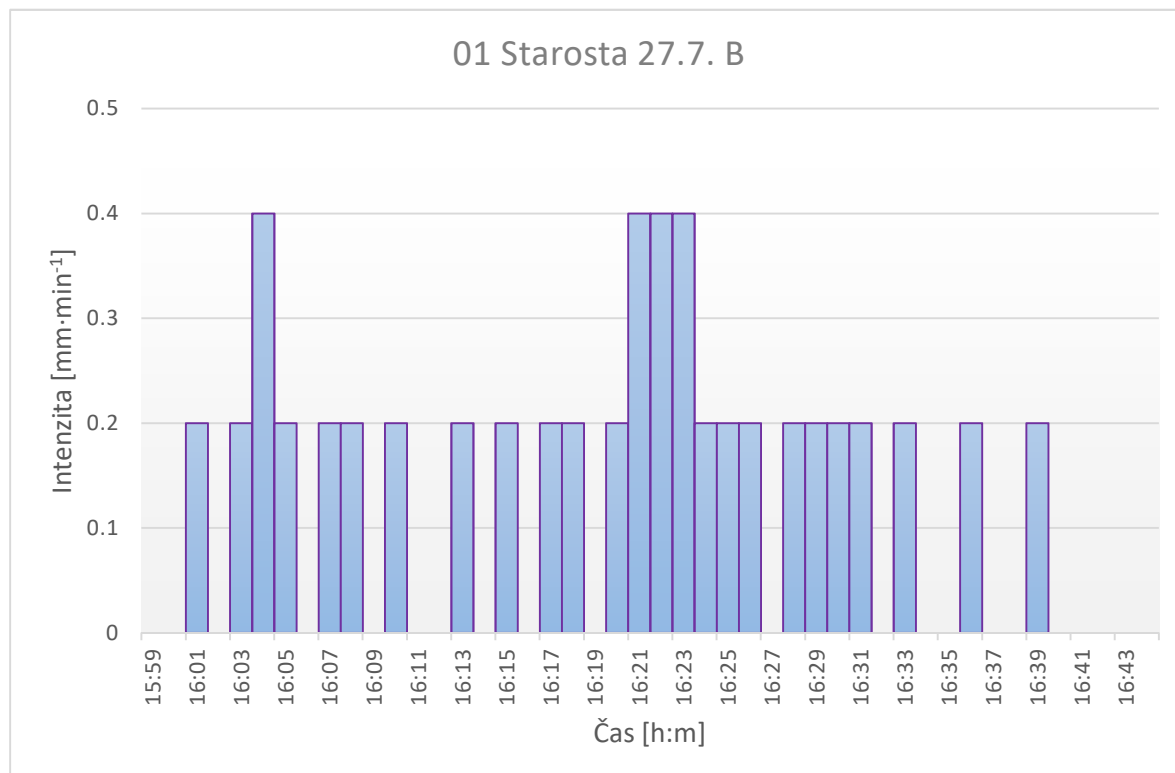


*Obr. 27 Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 27.7. A.*

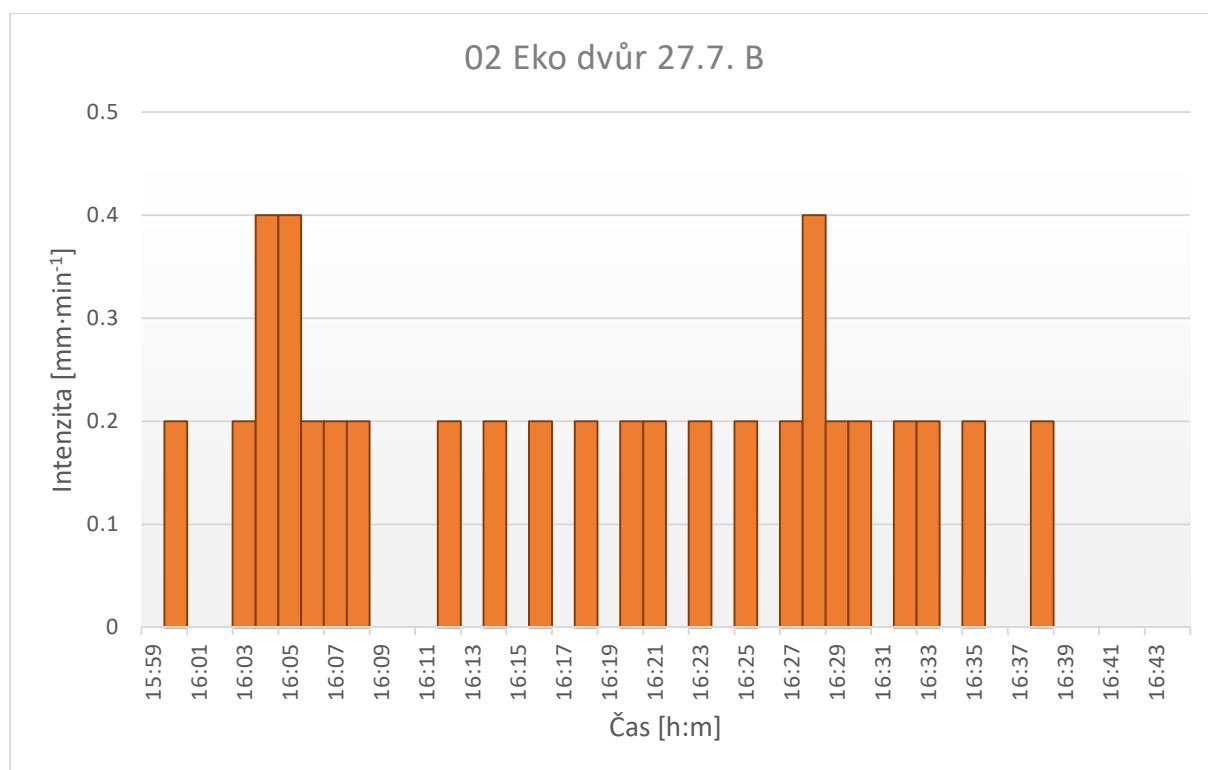


Obr. 28 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 27.7. A.

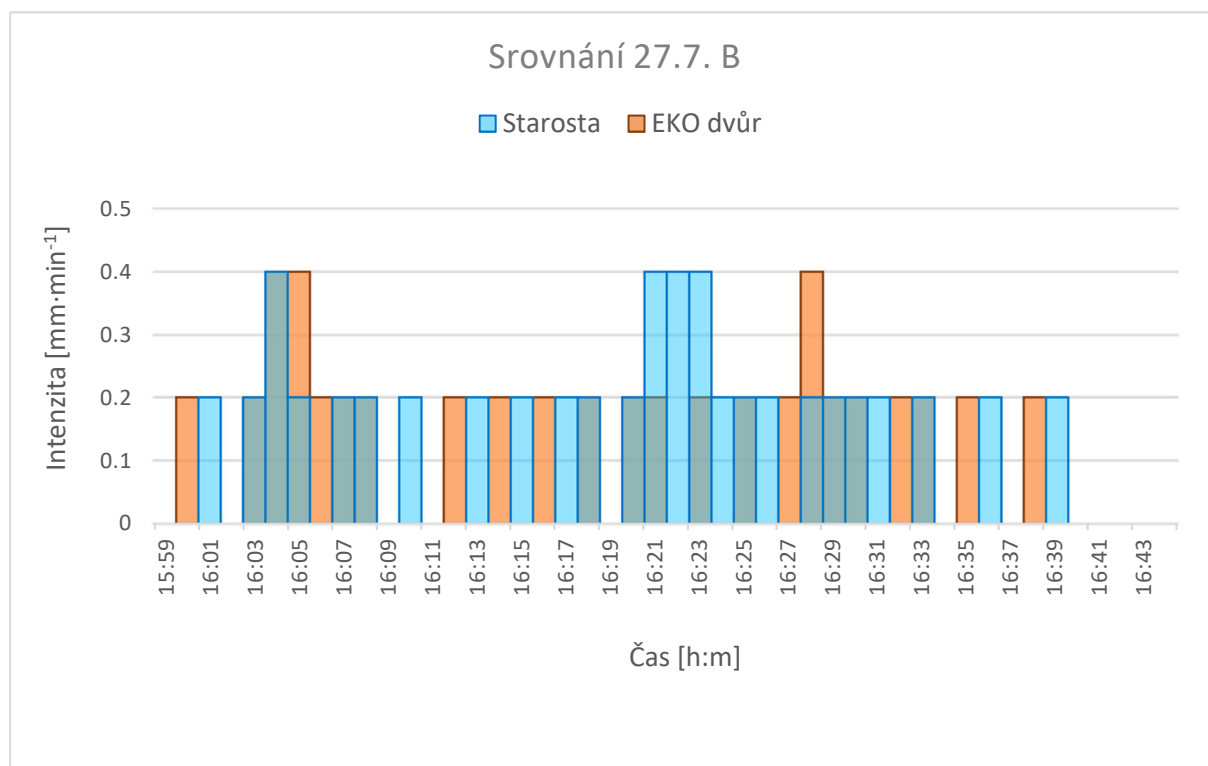
Děšť označený jako B měl naměřený úhrn srážkoměrem 01 5,8 mm, průběh viz obrázek číslo 29. Srážkoměr 02 zaznamenal úhrn 5,2 mm, průběh viz obrázek číslo 30. Na obrázku číslo 31 můžeme vidět jejich srovnání.



Obr. 29 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 27.7. B.



Obr. 30 Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 27.7. B.

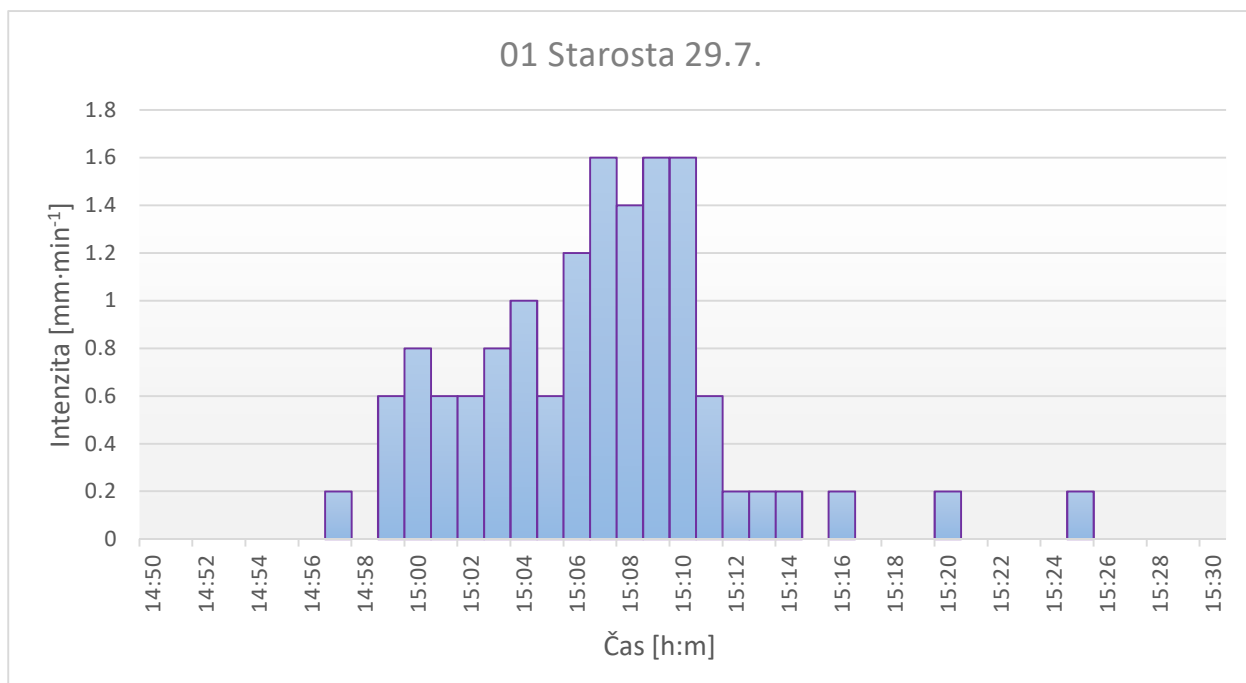


Obr. 31 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 27.7. B.



#### 4. Událost 29.7.

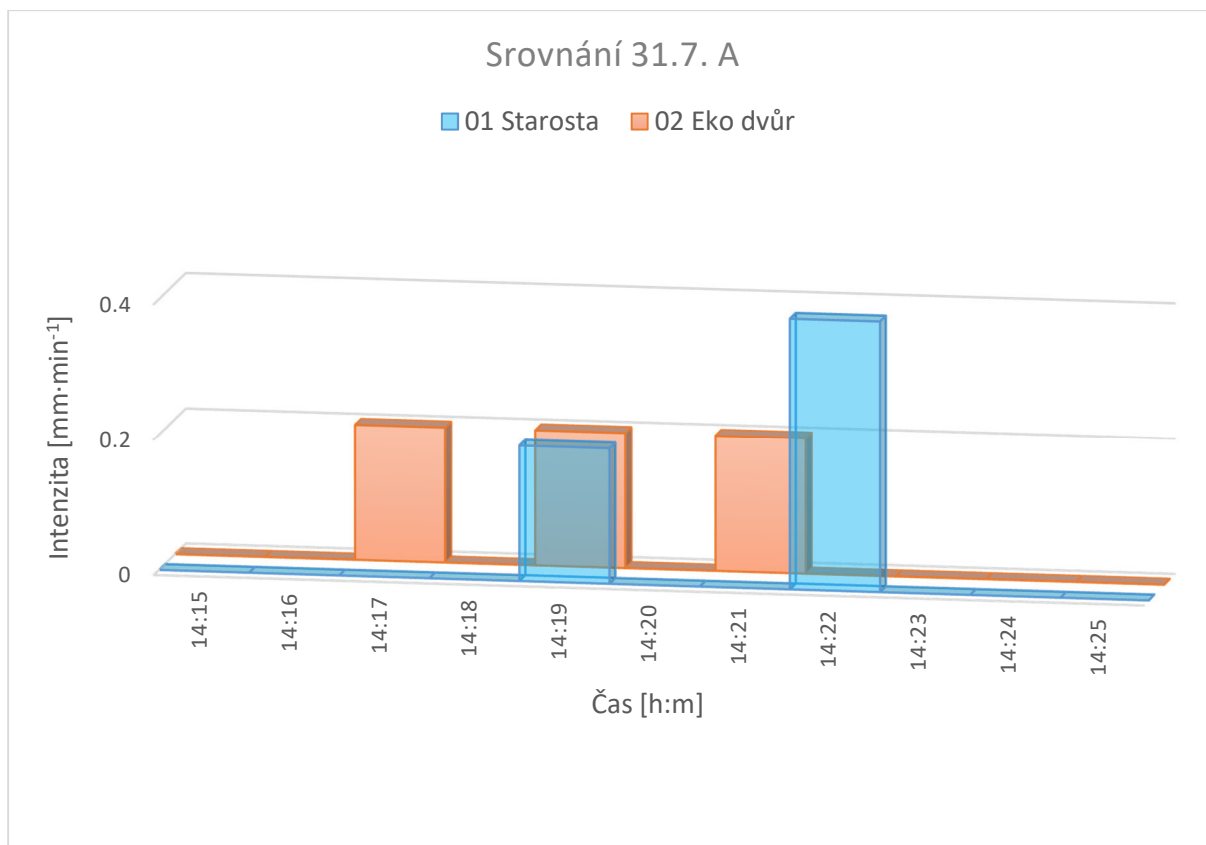
Čtvrtá událost probíhala 29.7. od 14:50 do 15:30. V tento den trvala závada se záznamem a přenosem naměřených dat na srážkoměru 02 Eko dvůr. Výstupy ze srážkoměru 01 Starosta můžeme vidět na obrázku číslo 32. Celkový zaznamenaný úhrn byl 14,4 mm.



Obr. 32 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 29.7.

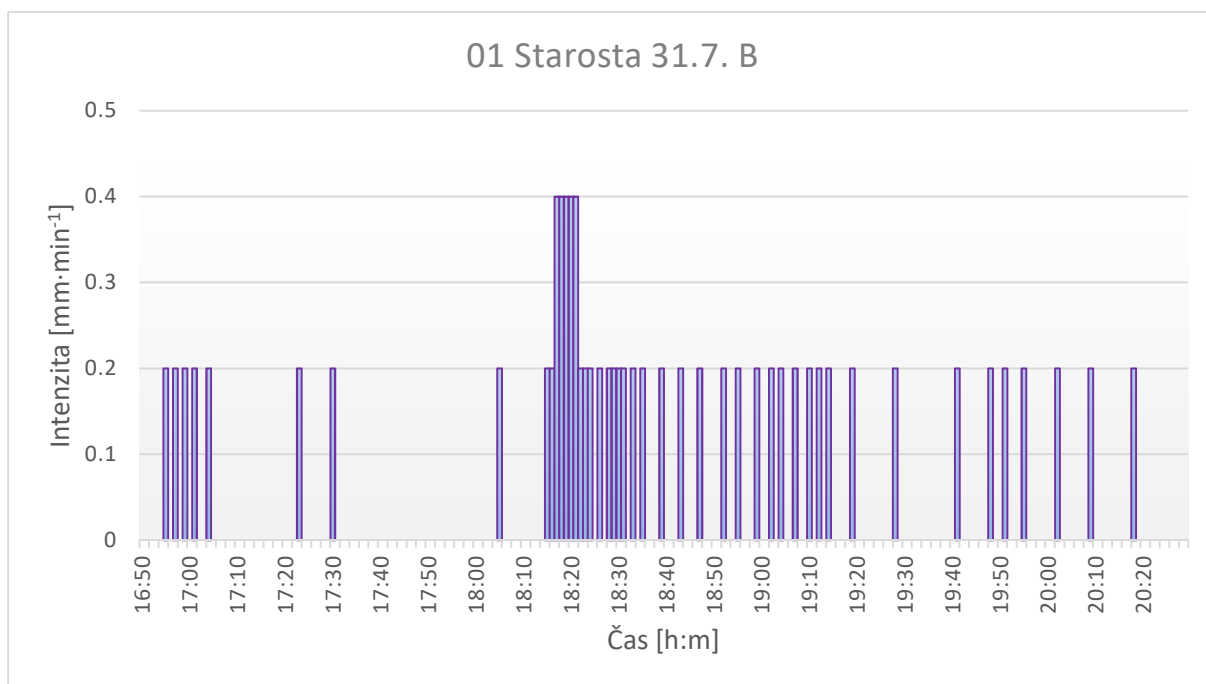
#### 5. Událost 31.7.

Pátá událost probíhala 31.7. od 14:00 do 20:30. Byla složena ze dvou dešťů s rozestupem 2,5 hodiny. U prvního deště, označen A, byl na obou srážkoměrech zaznamenan úhrn 0,6 mm, avšak s jinou intenzitou. Porovnání můžeme vidět v následujícím obrázku.

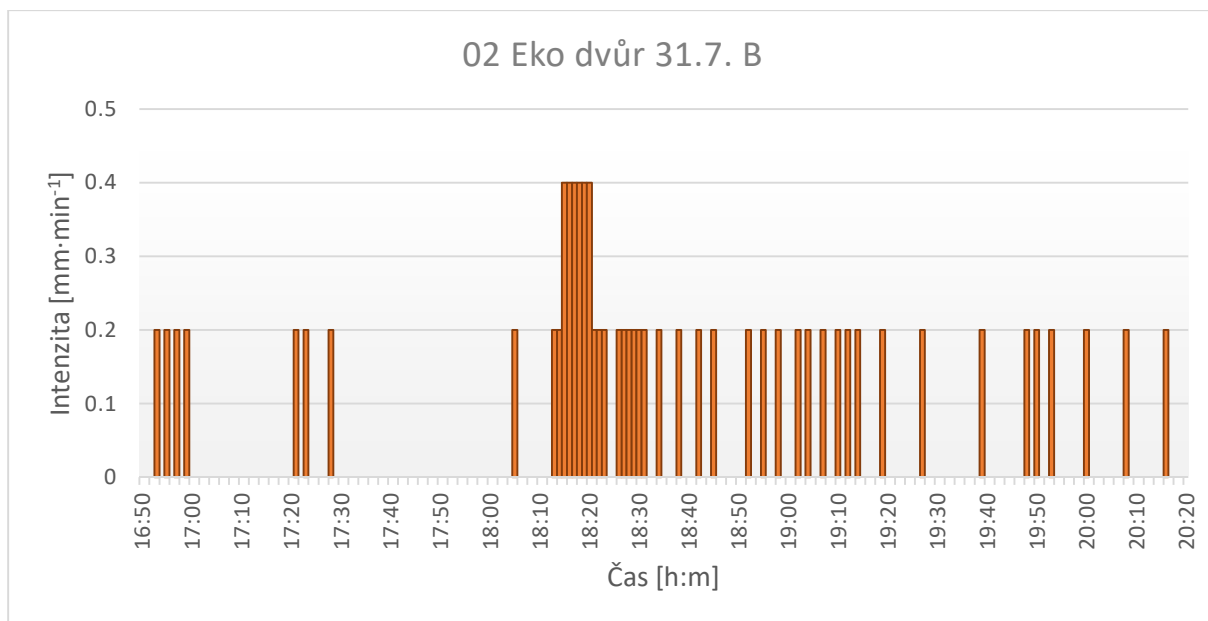


Obr. 33 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 31.7. A.

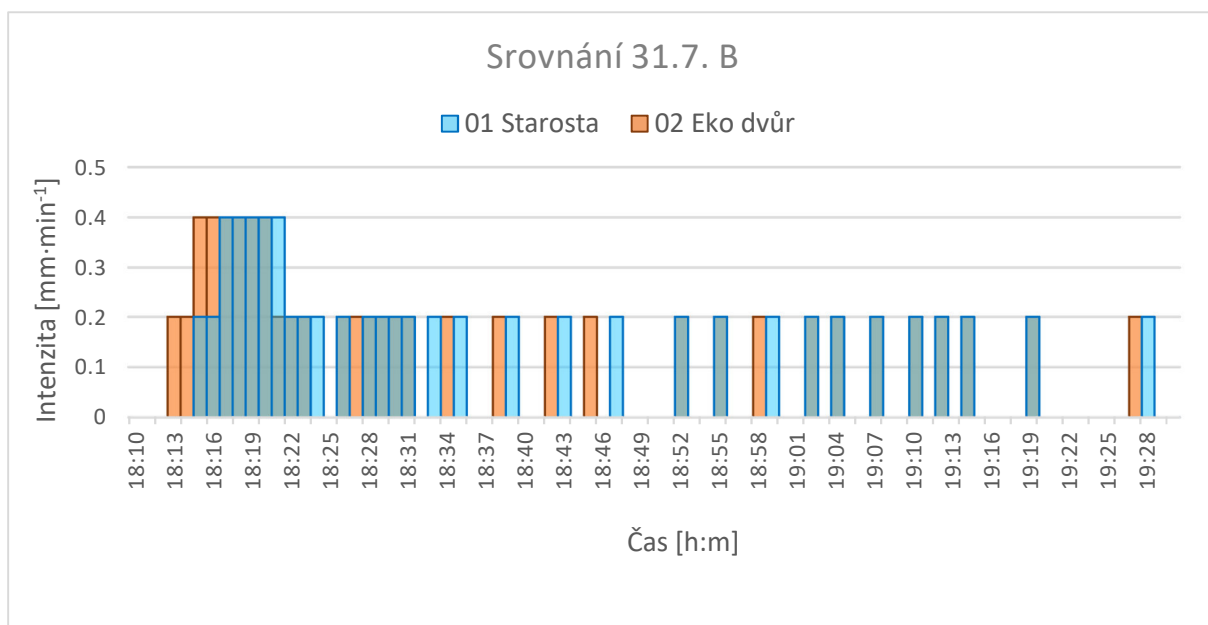
Záznamy obou srážkoměrů z druhé části epizody můžeme i s jejich srovnáním vidět na obrázcích níže. Zaznamenaný úhrn srážkoměrem 01 Starosta byl 10,2 mm, u srážkoměru 02 Eko dvůr 10,4 mm.



Obr. 34 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 31.7. B.



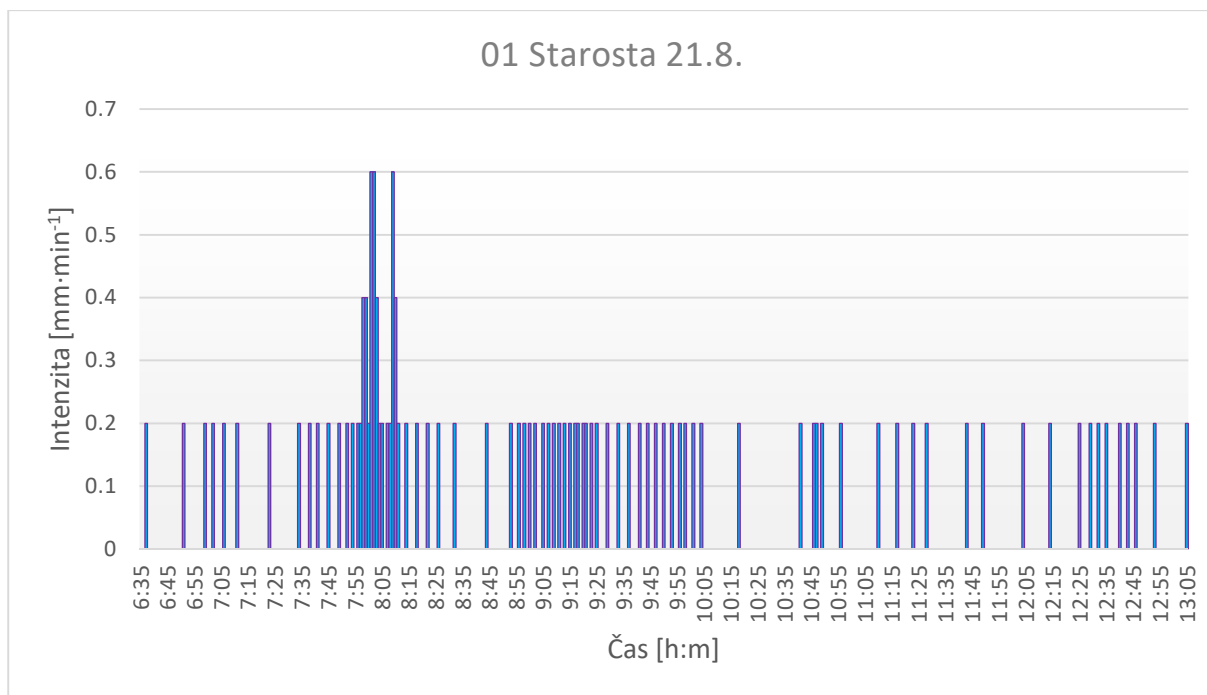
Obr. 35 Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 31.7. B.



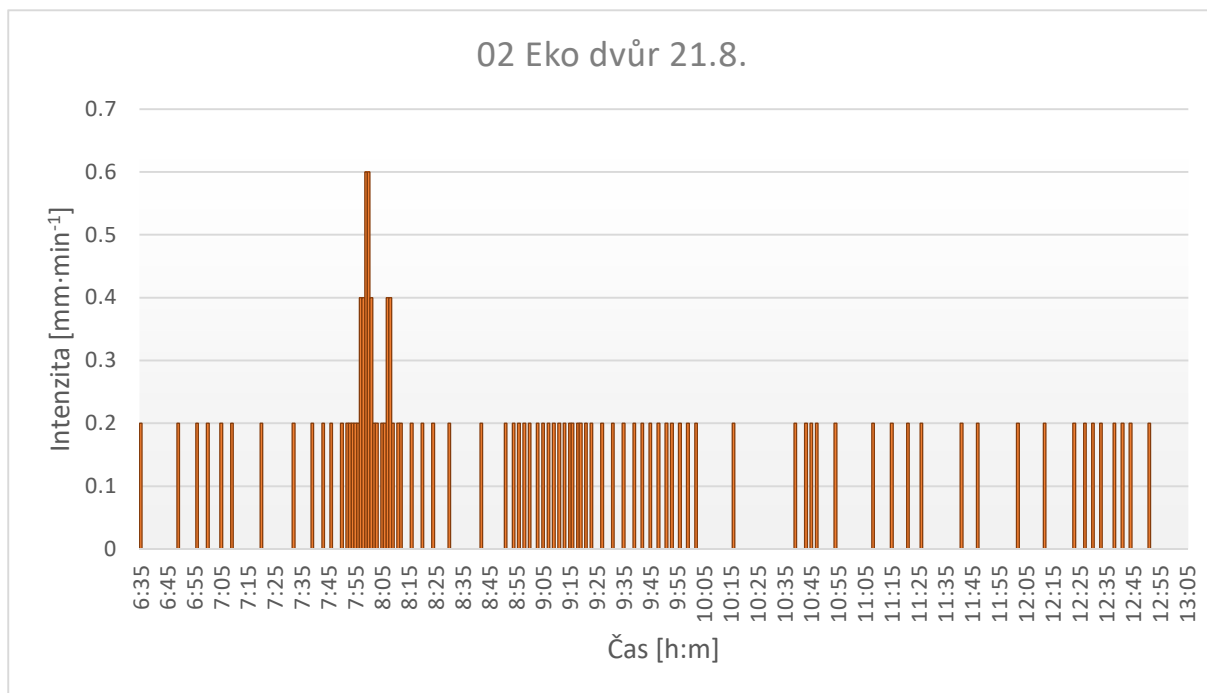
Obr. 36 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 31.7. B.

## 6. Událost 21.8.

Šestá událost probíhala 21.8. od 6:30 do 13:00. Na obrázku číslo 37 můžeme vidět zaznamenaný průběh deště srážkoměrem 01 o celkovém úhrnu 19,4 mm, obrázek číslo 38 obsahuje data srážkoměru 02, kdy byl zaznamenán celkový úhrn 19,2 mm.

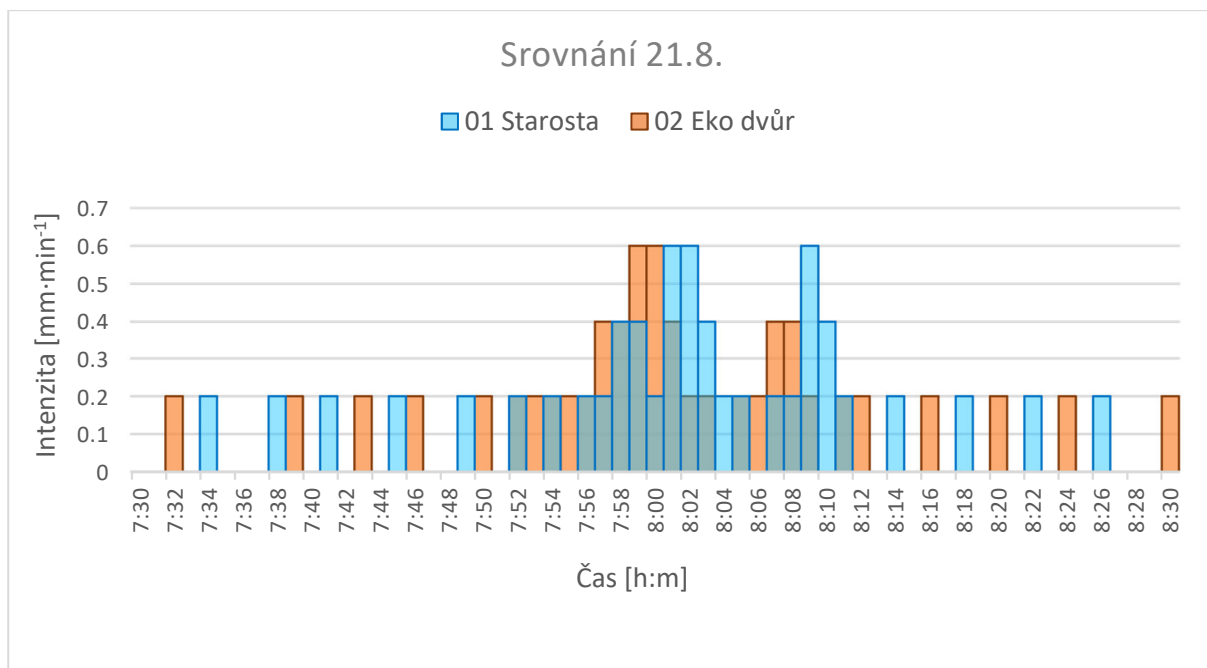


Obr. 37 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 21.8.



Obr. 38 Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 21.8.

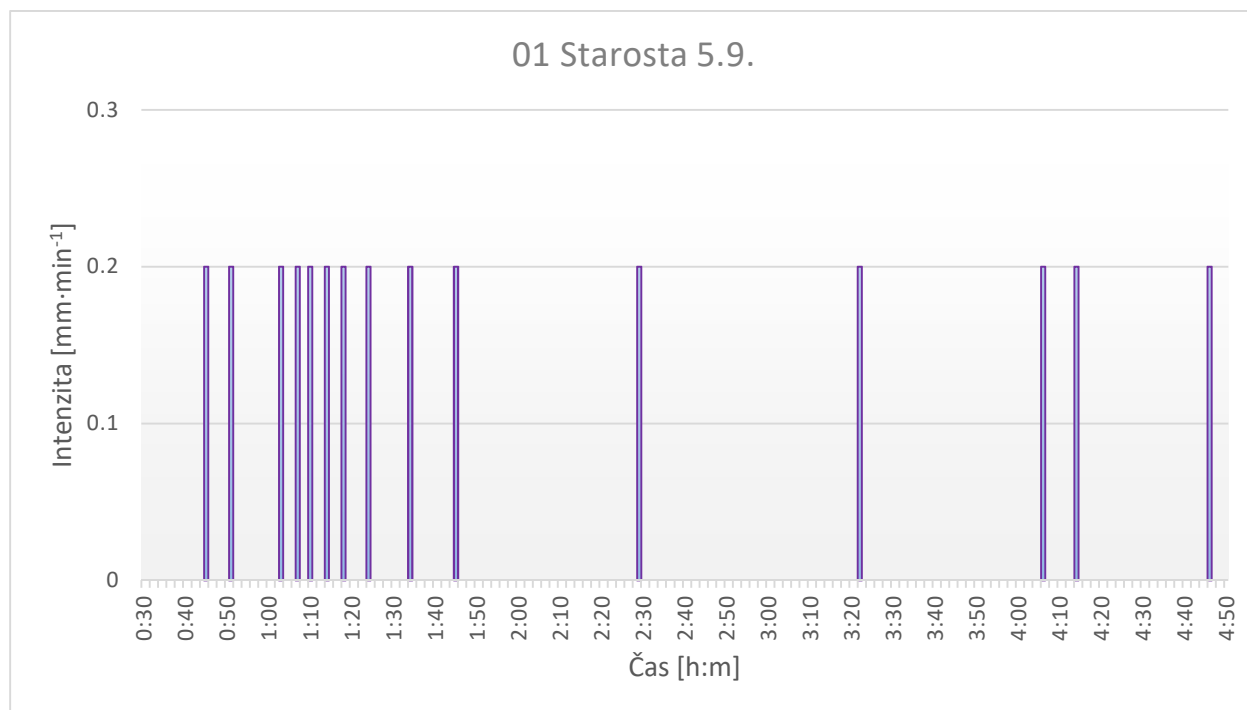
Na obrázku číslo 39 můžeme vidět srovnání záznamů obou srážkoměrů. Pro přehlednost byl vybrán časový úsek s nejvyšší intenzitou.



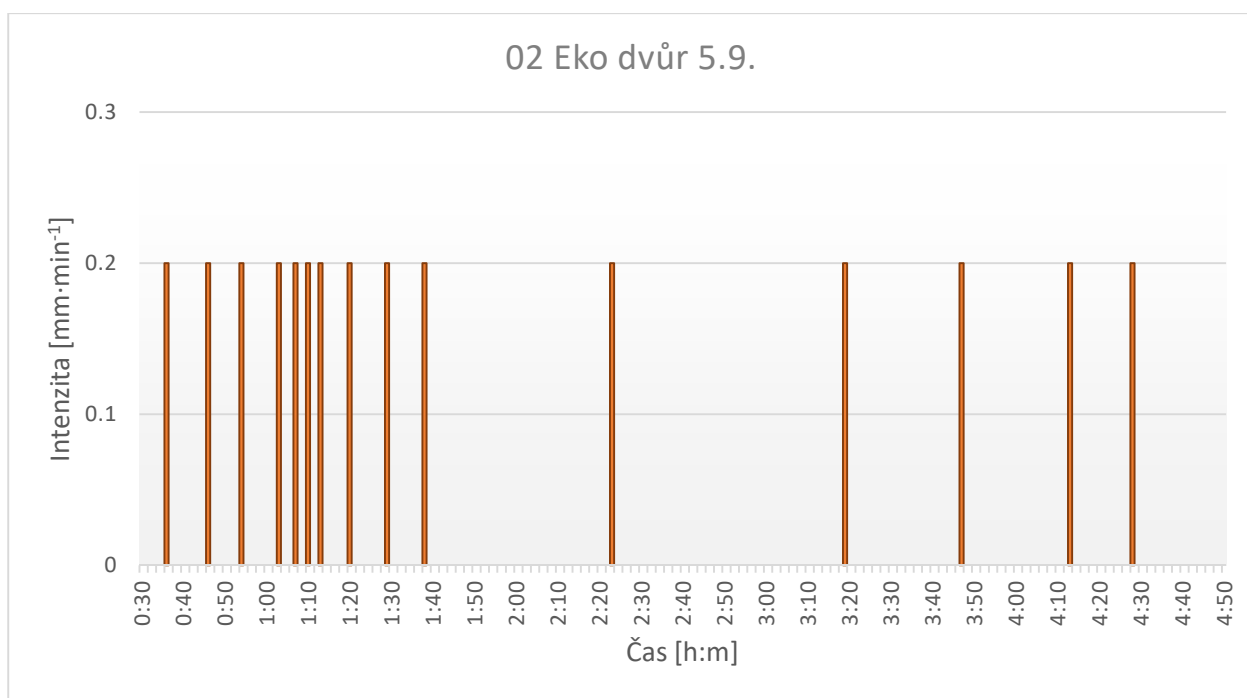
Obr. 39 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 21.8.

## 7. Událost 5.9.

Sedmá událost probíhala 5.9. přibližně od 0:30 do 05:00. Celkový úhrn srážky naměřený na obou srážkoměrech byl 3 mm. Zaznamenaný průběh deště můžeme vidět na následujících obrázcích.

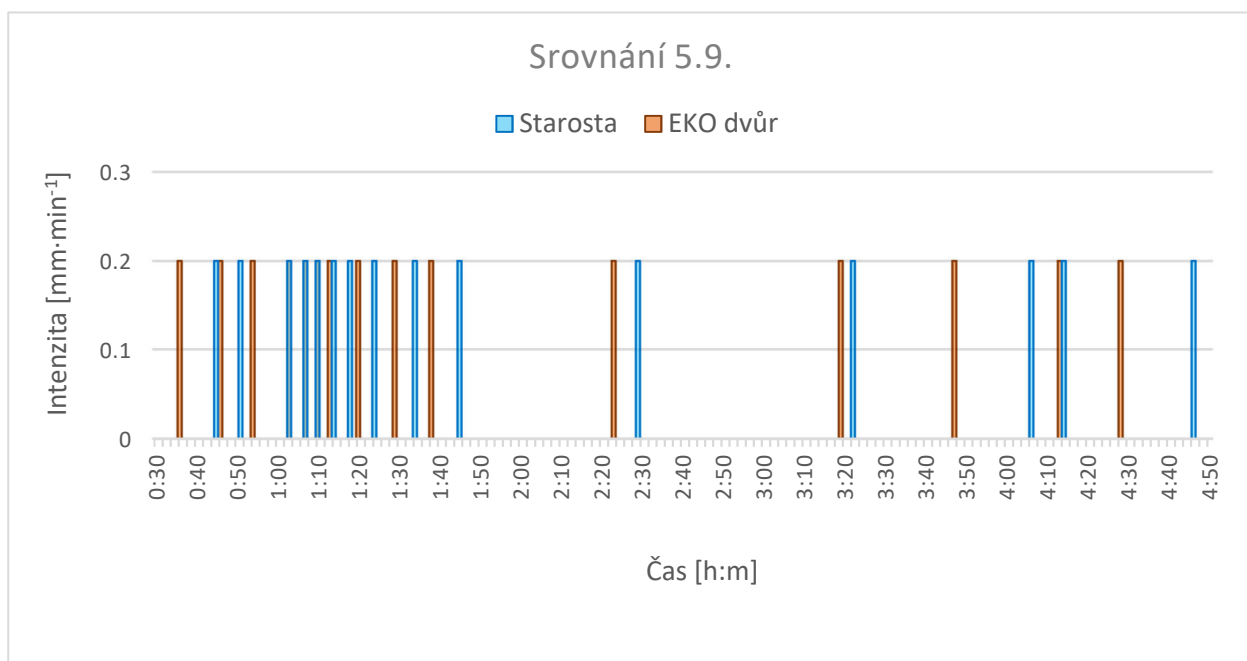


Obr. 40 Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 5.9.



Obr. 41 Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 5.9.

Obrázek č. 42 zobrazuje srovnání záznamů obou srážkoměrů.



Obr. 42 Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 5.9.

### 3.3.2 Data průtokoměru

Rovněž jako u dat ze srážkoměrů musí být před použitím data validována. Chyby v záznamech mohou být u ultrazvukového průtokoměru například způsobeny:

- vzniklou turbulencí;
- nedostatkem odrazových částecek;
- zanesením sondy;

V datech se pak jednorázově objevují rychlosti nulové či záporné. Při krátkodobém zanesení otvoru vyvíječe bublinek pak v datech můžeme najít nulové výšky hladiny. Tyto problémy nejsou většinou tak závažné a umožňují využití dat.

Dlouhodobé výpadky v záznamech dat pak mohou být způsobeny:

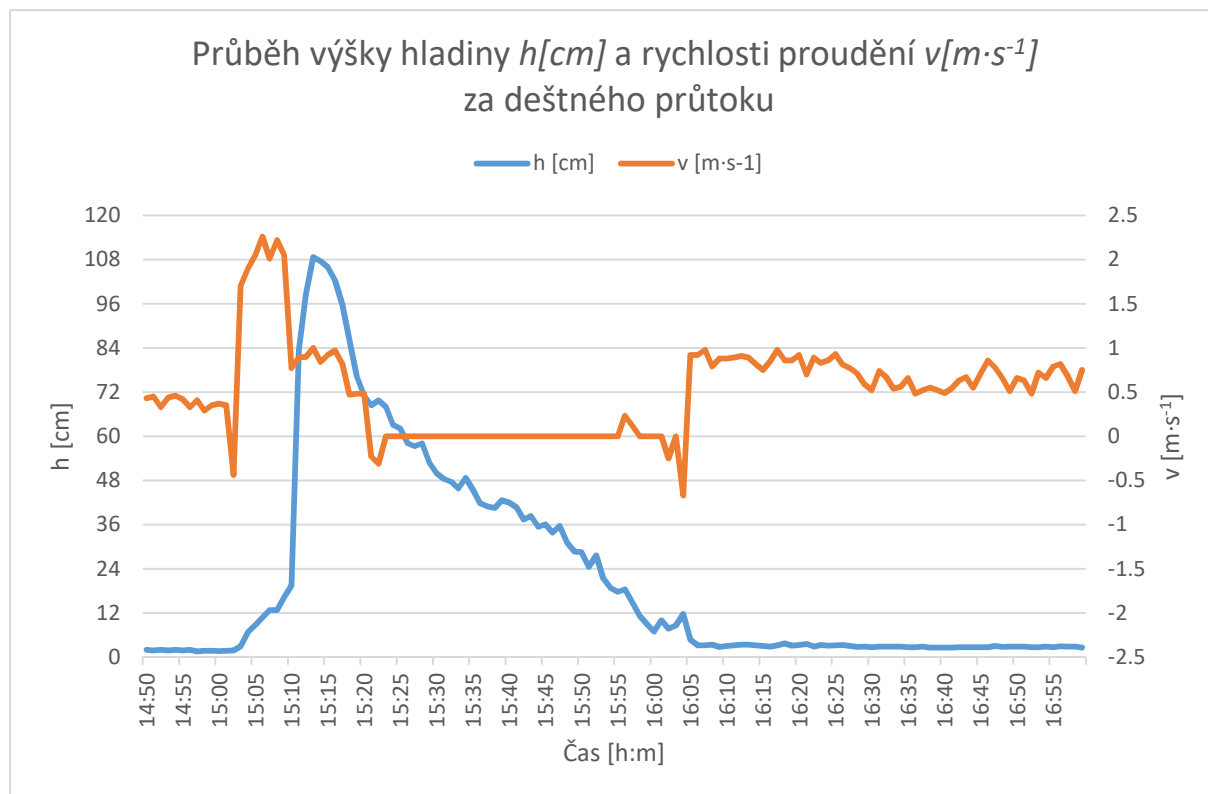
- zachycením předmětu (např. hadru) na sondě;
- vyčerpáním paměti či baterie;
- jiným problémem na průtokoměru či dataloggeru.

V našem případě byl v průběhu měrné kampaně zaznamenán jeden dlouhodobý výpadek v záznamu dat. Problém však probíhal v době, kdy nedošlo k žádné srážkové události.

Po validaci, tedy odstranění dat nepoužitelných pro další práci, mohou být data rozdělena na jednotlivé události. Ty začínají bezdeštným průtokem před začátkem deště a končí v době, kdy se průtok v měrném profilu znovu ustálí na hodnotách běžných pro bezdeštné stavy. Shora jsou tedy ohraničeny časem začátku deště, zespoda časem dotoku veškeré dešťové vody, která se dostala do stokové sítě.

## Naměřená data

Tato podkapitola obsahuje vyvolané odezvy v měrném profilu při uvedených dešťových událostech v předchozí kapitole. Jak můžeme vidět na následujícím obrázku, podle předpokladu docházelo v průběhu dešťového odtoku z povodí ke zpětnému vzduť vody v měrném profilu. Jako příklad je uveden obrázek číslo 43, který popisuje průběh výšky hladiny a rychlosti proudění v měrném profilu při dešťové události ze dne 29.7.



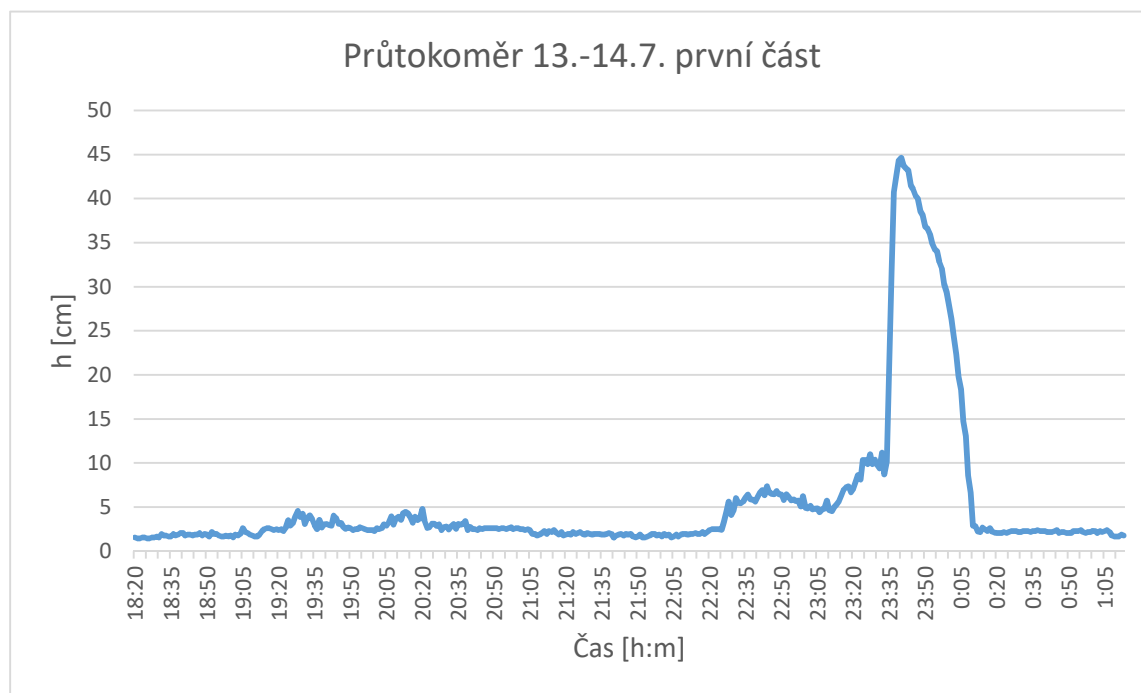
Obr. 43 Průběh výšky hladiny a rychlosti proudění při události dne 29.7.

Vlivem plnění retenčního objemu separátoru a následnou propagací zpětné vlny (vzduť) do měrného profilu, způsobené seškrcením odtoku ze separátoru, není možné použít ke kalibraci data průtoku. Vzduť vody způsobuje zpomalení rychlosti proudění na přístrojem neměřitelné hodnoty. Čidlo rychlosti je také ovlivňováno turbulentemi. Výsledkem jsou tedy nulové či záporné rychlosti (tím pádem i průtoky), i když prokazatelně voda odtéká z měrného profilu směrem na separátor. To znemožňuje provádět kalibraci simulačního modelu na průtok. Naměřená křivka průtoku totiž nemůže mít shodný průběh s vypočtenou křivkou, z důvodu vzniku chyb při měření. Bylo tedy rozhodnuto kalibrovat model na výšku hladiny v měrném profilu. Dnová sonda totiž dokáže měřit výšku vody přesně i při nástupu tlakového režimu proudění. Srážkové události vyvolaly v měrném profilu následující odezvy.



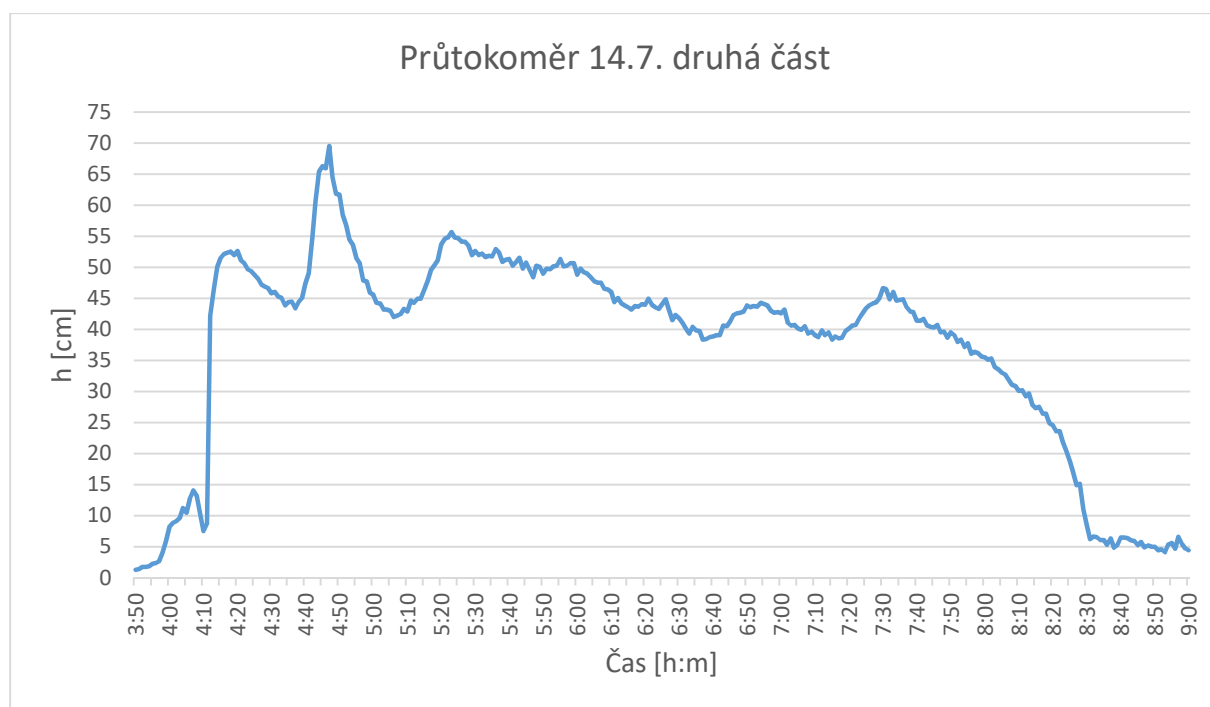
## 1. Událost 13.7.- 14.7.

Pro tuto událost jsou z důvodu přehlednosti výstupy naměřené průtokoměrem rozděleny na 3 části, a to dle průběhu srážek. V naměřených datech průtokoměru v první části (18:15 až 01:15) můžeme vidět, že déšť (cca od 18:15 do 20:15) nezpůsobil výraznou odezvu v měrném profilu. Na povodí se tedy výrazný odtok nerealizoval, došlo k omočení povrchu a zaplnění prohlubní. Nástup výšky hladiny je patrný od 22:30, kdy přišel s přibližně dvouhodinovým odstupem další déšť. Hladina vystoupala do výšky 44 cm. Průběh výšky hladiny v této první části deště můžeme vidět na obrázku číslo 44.



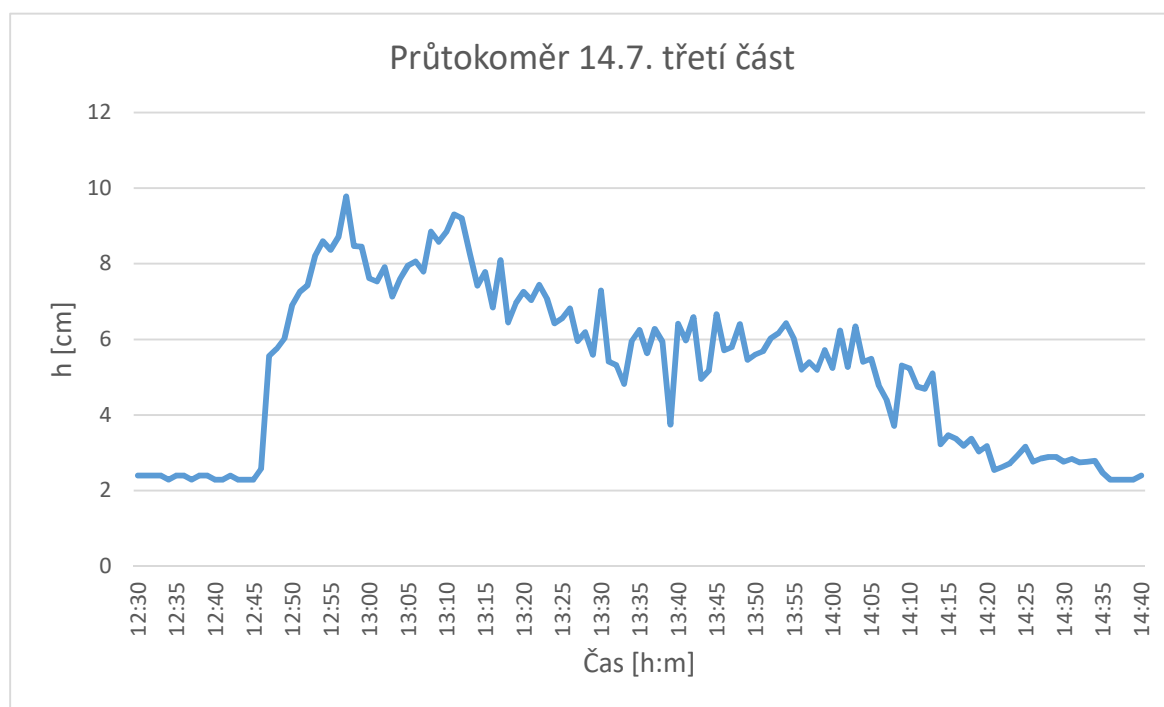
Obr. 44 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /1

Déšť s nejvyšší intenzitou (cca od 3:45 do 8:00) vyvolal v měrném profilu maximální výšku hladiny 70 cm. Průběh druhé části události můžeme vidět na obrázku číslo 45.



Obr. 45 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /2

V poslední části (12:15 až 14:40) vystoupala hladina do výšky maximálně 10 cm, viz obrázek číslo 46.

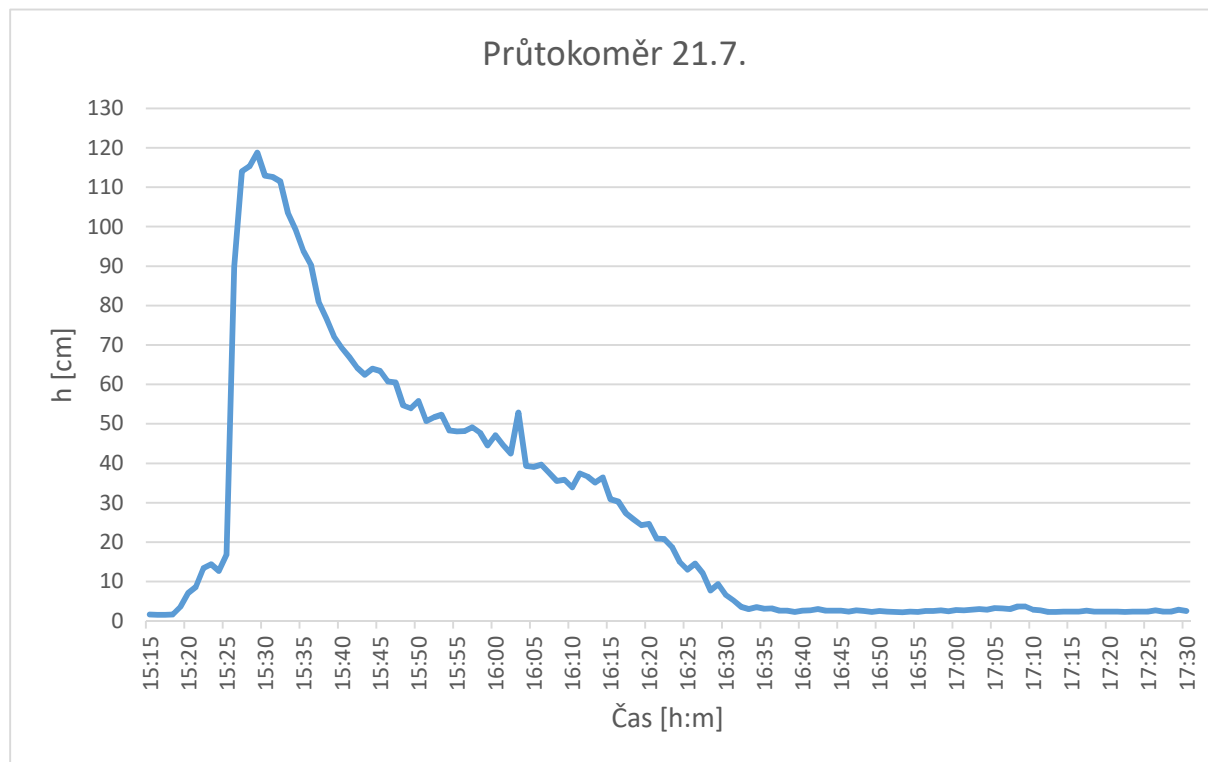


Obr. 46 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /3

## 2. Událost 21.7.

Při této srážkové události o krátké době trvání a poměrně vysoké intenzitě došlo k zaplnění průřezu potrubí v místě umístění sondy. Jak již bylo uvedeno dříve, vnitřní

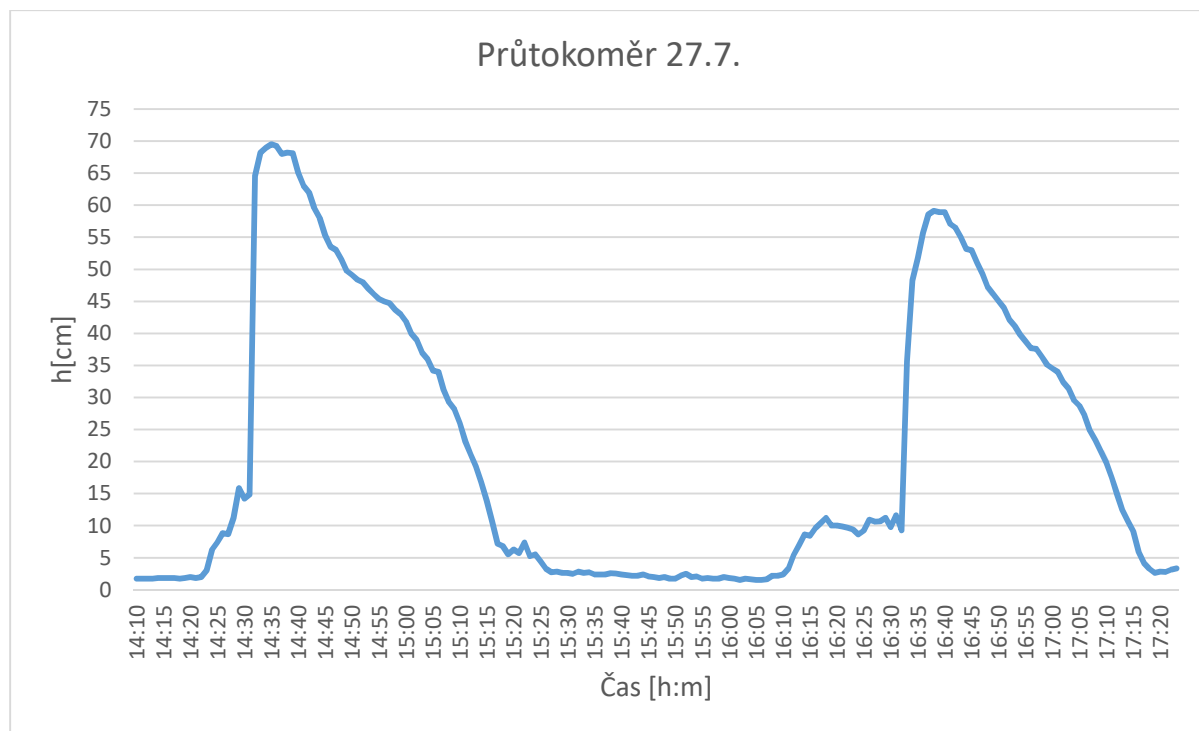
svislá vzdálenost mezi stěnami potrubí (výška průtočného profilu) je v tomto místě 86 cm. Maximum tlakové výšky při této epizodě dosáhlo k téměř 120 cm, viz obrázek číslo 47.



*Obr. 47 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /1*

### 3. Událost 27.7.

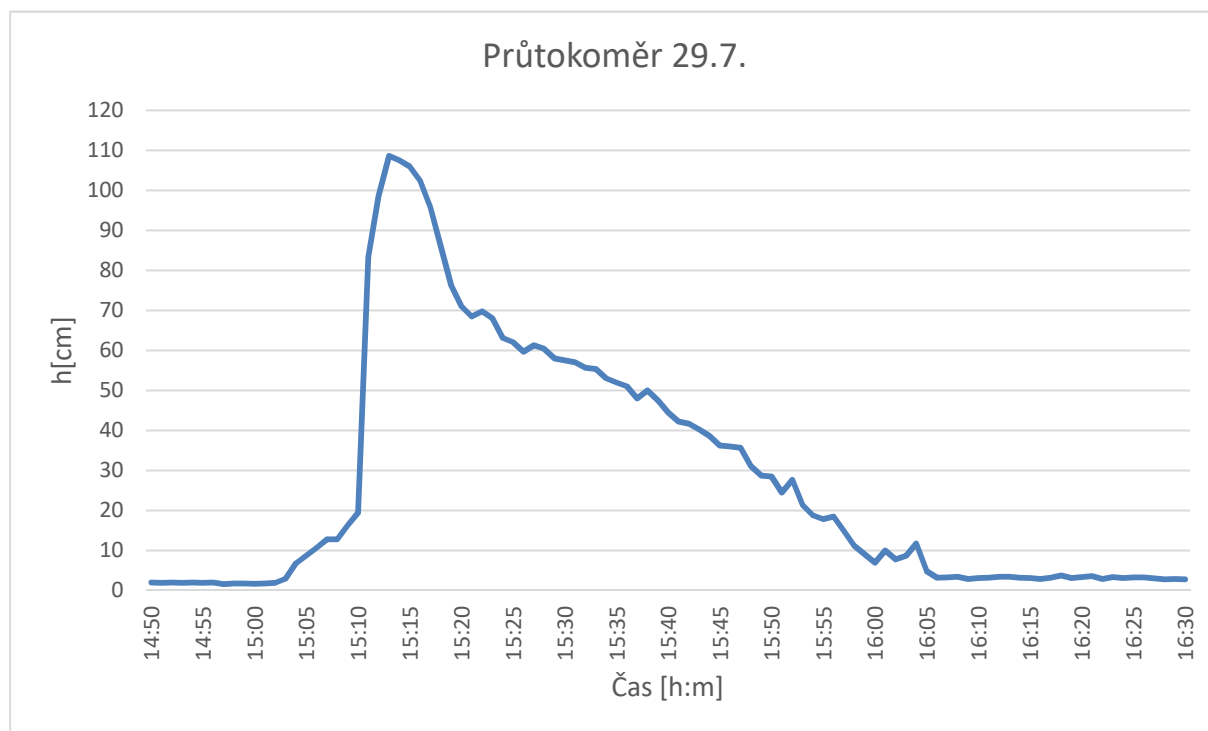
Třetí událost složená ze dvou dešťů s přibližně hodinovým rozestupem vyvolala maximální výšky hladiny v měrném profilu 70 cm a 60 cm, viz obrázek číslo 48.



*Obr. 48 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 27.7.*

#### 4. Událost 29.7.

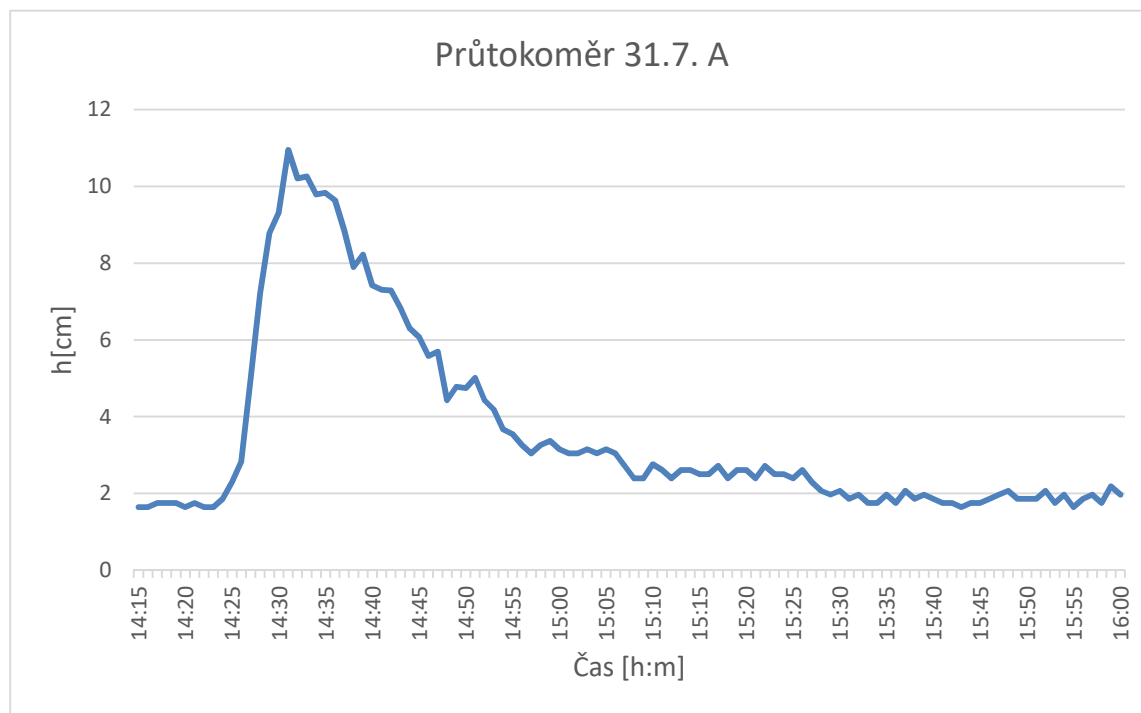
Při čtvrté srážkové události došlo k zaplnění celého průtočného profilu. Tlaková výška v měrném profilu měla maximální hodnotu 109 cm. Průběh můžeme vidět na obrázku číslo 49.



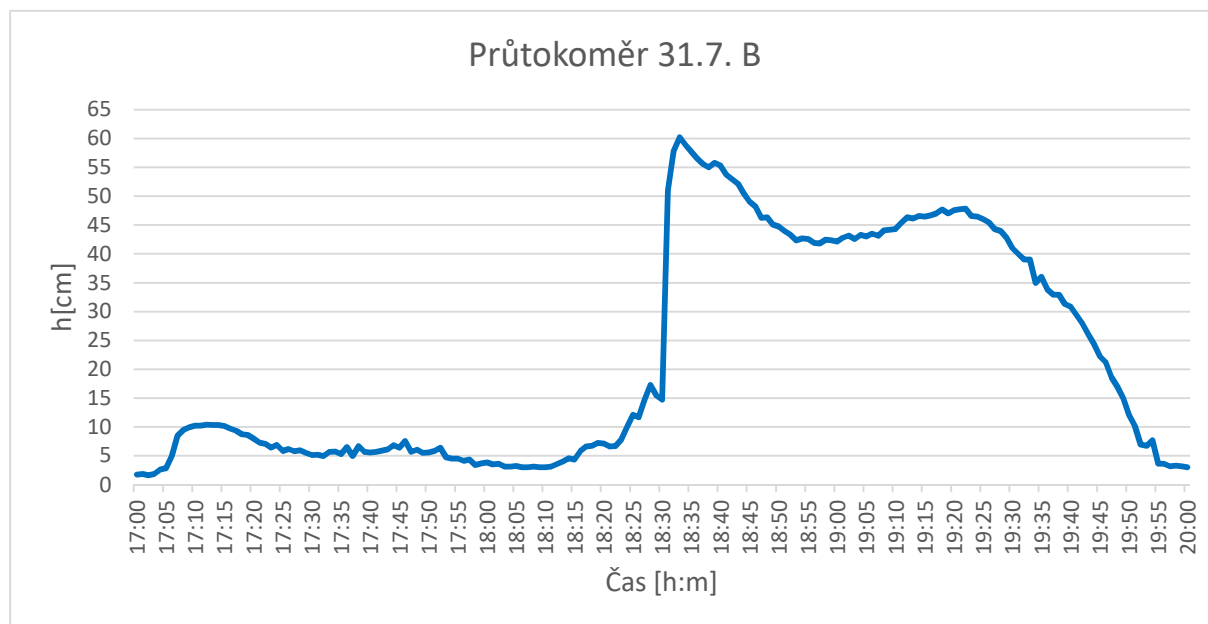
*Obr. 49 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 29.7.*

## 5. Událost 31.7.

Tato dešťová událost se skládala ze dvou dešťů (A a B), jejichž rozestup byl cca 2,5 hodiny. Z tohoto důvodu jsou zde i zaznamenané výstupy z průtokoměru rozděleny. Odezvu ve stokové síti na první dešť můžeme vidět na obrázku číslo 50, na obrázku číslo 51 můžeme vidět část druhou.



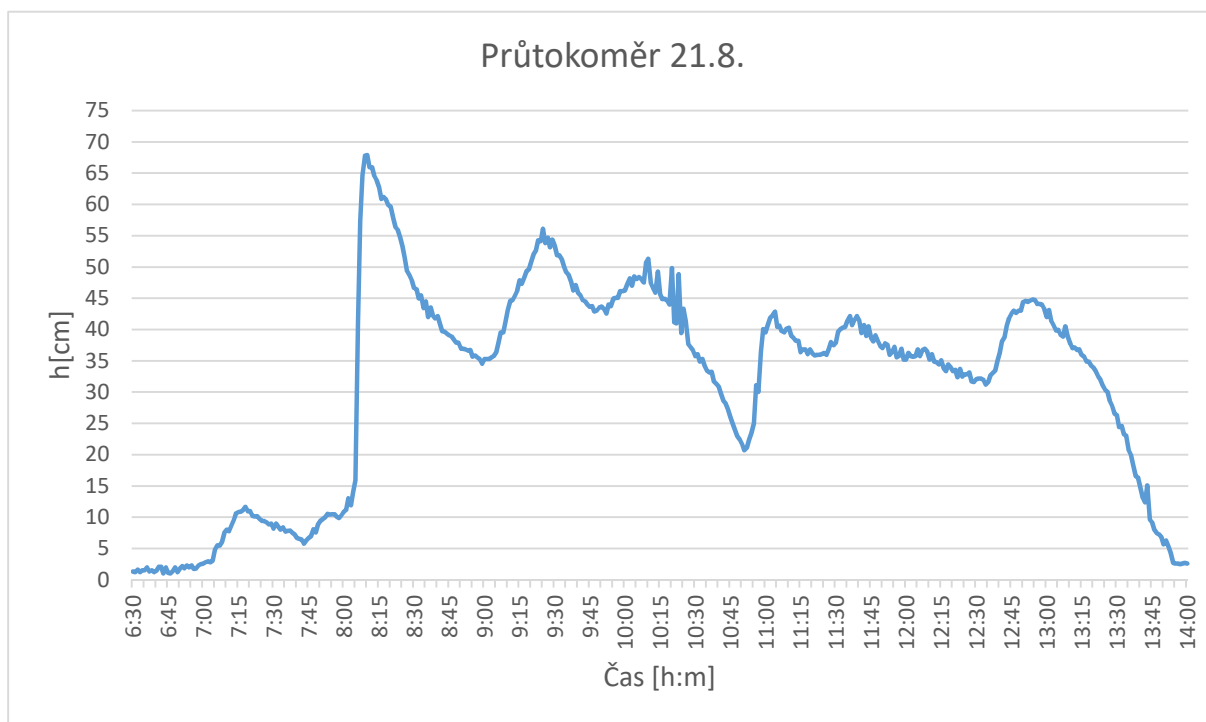
Obr. 50 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 31.7. A



Obr. 51 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 31.7. B

## 6. Událost 21.8.

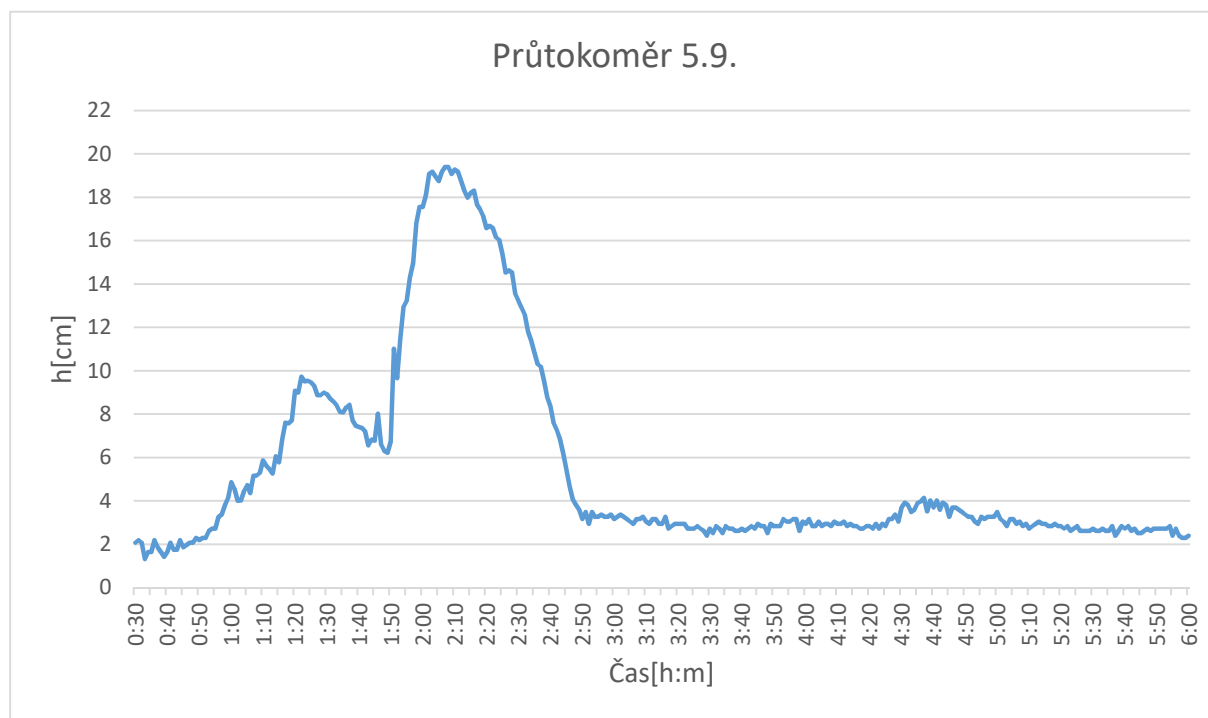
Průběh výšek hladiny při šesté události můžeme vidět na obrázku číslo 52. Při maximálním úhrnu deště byla vyvolána výška hladiny 68 cm.



Obr. 52 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 21.8.

## 7. Událost 5.9.

Poslední zaznamenaná dešťová epizoda způsobila v měrném profilu maximální výšku hladiny 19 cm. Průběh viz obrázek číslo 53.



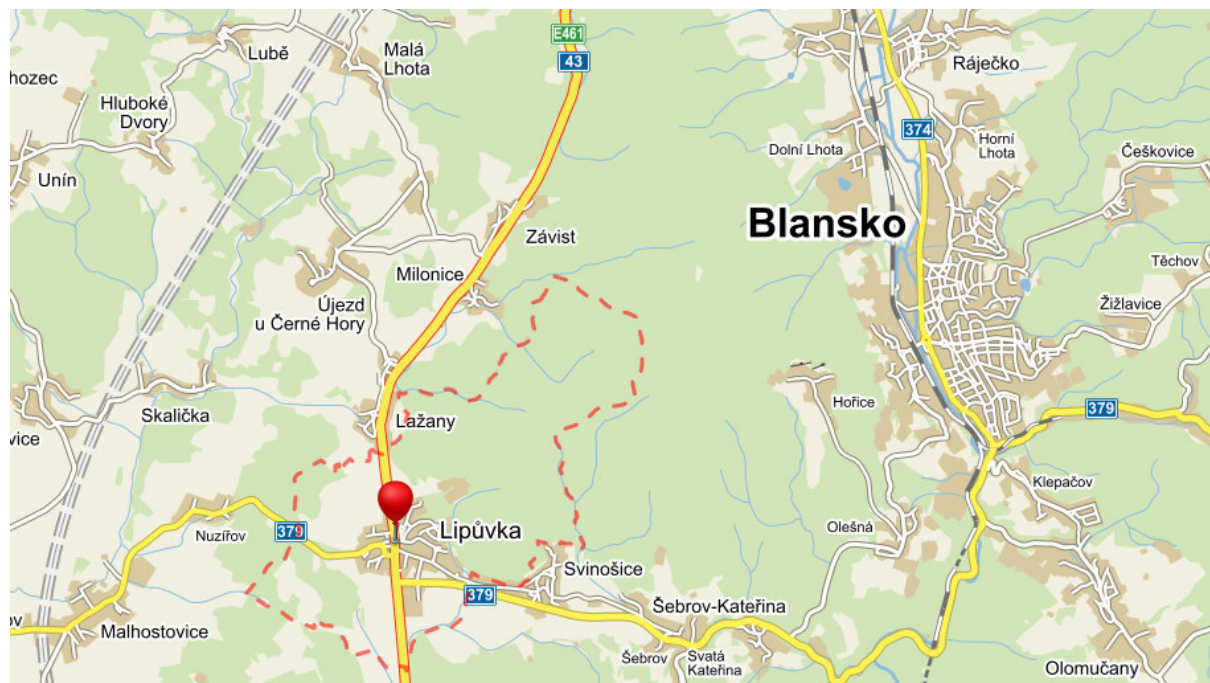
Obr. 53 Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 5.9.

## 4 SIMULAČNÍ MODEL

Cílem této diplomové práce je hydraulické posouzení stokové sítě v obci Lipůvka. Toto posouzení má být provedeno pomocí kalibrovaného simulačního modelu. Pro tvorbu tohoto modelu byl zvolen software SWMM, který je vyvíjen společností U.S. EPA a který je volně k dispozici. Popis tohoto softwaru je obsažen v kapitole 2.2.4. Pro tvorbu samotného simulačního modelu je potřebné získat co nejvíce informací, popisujících dostatečně řešenou problematiku. V následujících podkapitolách se budeme věnovat popisu zájmového území, tedy obci Lipůvka, dále druhy podkladů pro tvorbu modelu, samotnou tvorbu a výslednou podobou modelu (schematizace, počty objektů). Dále také kalibraci a verifikaci modelu, pro něž slouží jako podklady vhodné výstupy z měrné kampaně.

### 4.1 POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Posuzovaná stoková síť se nachází v obci Lipůvka. Obec leží v Jihomoravském kraji v okrese Blansko, asi 15 kilometrů severně od města Brna. V obci žije podle úředních záznamů 1287 osob, je zde přiděleno 452 čísel popisných (44 rekreačních domů, 375 rodinných a bytových domů, 33 ostatních objektů a neobsazených čísel popisných) a 53 čísel evidenčních (chaty, garáže). Co se týče vybavenosti, součástí obce je i základní škola, mateřská škola, restaurační zařízení, obchod s potravinami, menší zdravotnické zařízení. Žádný významný producent odpadních vod se v obci nenachází. [20]



Obr. 54 Lokalizace obce Lipůvka. [21]





*Obr. 55 Letecký snímek obce Lipůvka. [21]*

Obec se nachází v povodí řeky Dyje, podoblast Svratka po Svitavu. [22] Obcí protéká říčka Lipůvka, která slouží jako recipient pro odlehčení vod ze stokové sítě za deštých průtoků. Výúst odlehčení se nachází v jihozápadní části obce (levý dolní roh fotografie).

Z hlediska geologických poměrů se zájmové území nachází v severní části brněnského masivu. V horních svahových partiích je vyvinut zvětralinový plášť hornin brněnského masivu, jehož mocnost je odvislá tektonické porušenosti hornin, chemizmu a průniku povrchových vod do zvětrávací zóny. Dále se na zájmovém území nachází eolické sedimenty identifikovány jako spraše nebo sprašové hlíny o různé konzistenci. Neogenní sedimenty, charakteristické častými litofaciálními změnami v horizontálním i vertikálním směru, vytvářejí z hydrogeologického hlediska systém velmi nepravidelně se střídajících izolátorů (jíly) a průlinových vrstevových kolektorů (písky, šterky). Půdní typologie hnědozem. [23]

## 4.2 POPIS STOKOVÉ SÍTĚ

V obci Lipůvka je vybudována jednotná kanalizace, jejíž stáří je odhadováno na 30 až 50 let. Převážná část kanalizace byla vybudována postupně v akci „Z“, kvalita technické úrovně uložení potrubí a vybudovaných objektů na stokách odpovídá této skutečnosti.



V devadesátých letech minulého století byl pod obcí vybudován separátor odpadních vod s odlehčením do toku Lipůvka. Součástí této stavby byla spodní část kmenové stoky „A“ a přivaděč odpadních vod na Kuřim, ty pak dále pokračují na městskou čistírnu odpadních vod ČOV Brno Modřice. V roce 2008 proběhla výstavba jednotné kanalizace v místní části obce Horky pro výstavbu rodinných domů. Ve stejném roce došlo k rekonstrukci krajské komunikace II/379 v části u kostela, směrem na Tišnov. V této části obce došlo k odstranění havarijního stavu kmenové stoky „A“ DN 800 a vybudování nové kanalizace z trub sklolaminátových DN 1200. [24]

V roce 2015 probíhal v obci projekt s názvem *Lipůvka-odkanalizování výustí*. Jednalo se o podchycení výustí *jihozápad* a *jihovýchod*. U první jmenované se jednalo o výstavbu nového řadu, který přivádí odpadní vody z jižní části obce. Nově vybudovaný řad je napojen na kmenovou stoku „A“ ve spojně komoře SP1 (uzel A\_U2) asi 15 metrů před poslední šachtou Š1 (uzel S1). Řad je z materiálu železobeton DN 600. Kanalizační řad prochází pod státní silnicí I/43. Původně měl být řad zhotoven v celé své délce ze stejného materiálu i dimenze potrubí, vzhledem k technickým potížím při provádění protlaku je však tento zhotoven z potrubí PE 500 SDR17 o délce 49 metrů. Obrázek č. 56 zobrazuje výstavbu tohoto řadu v místě před napojením na kmenovou stoku A.



Obr. 56 Výstavba řadu ŽB DN 600, rok 2015.

U podchycení výustí *jihovýchod* se jednalo o výstavbu gravitační stoky splaškové kanalizace PP DN 250 o délce 537 m. Stoka byla budována v ulici směrem na Svinošice a je situována převážně v místní komunikaci. Odvádí odpadní vody do čerpací stanice, ze které jsou přečerpávány do stávající stokové sítě. Kanaizační výtlak je z potrubí PE 110x10 mm, má délku 547 m a je rovněž situován převážně v místní komunikaci. [25]

V letošním roce byla provedena rekonstrukce havarijního stavu betonového potrubí stoky B2 u bytových domů. Byla provedena výměna potrubí PP DN 300 ve stejné trase o délce 48 m. [26]

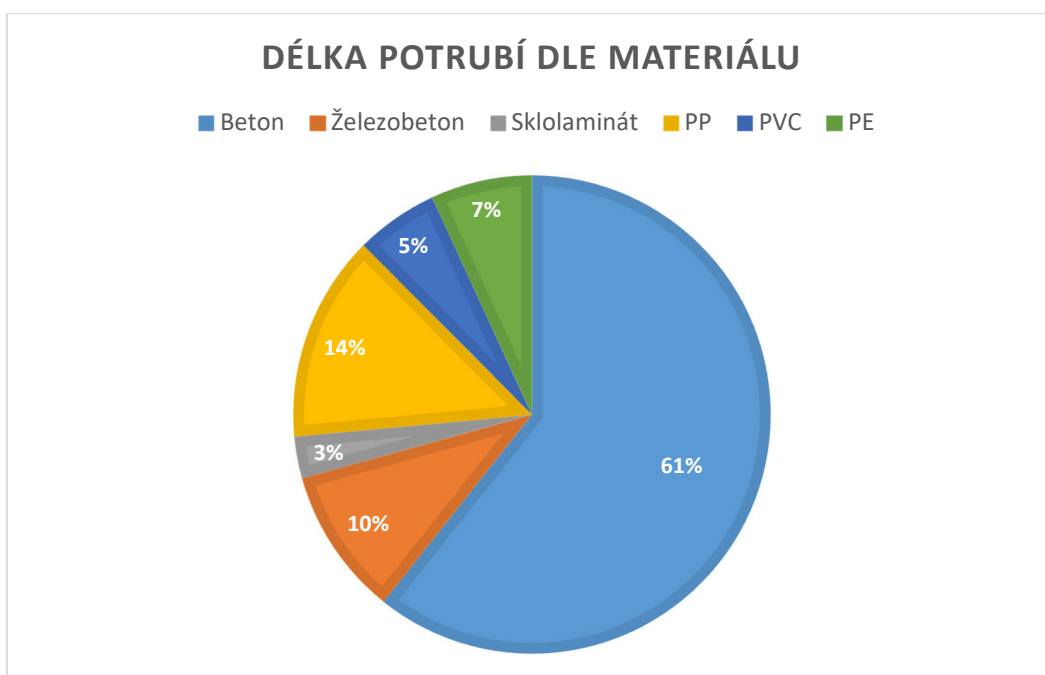


Obr. 57 Rekonstrukce stoky B2, rok 2016.

Stoková síť v obci Lipůvka je složena z materiálů: železobeton, prostý beton, sklolaminát, polyvinylchlorid, polypropylen, polyethylen. Jedná se o stokovou soustavu jednotnou, odpadní vody jsou odváděny převážně gravitačně, nachází se zde jedna čerpací stanice s výtlačným potrubím, popsána viz výše. V následujících tabulkách a obrázcích můžeme vidět délky sítě rozdělené dle materiálů a dimenzí.

Tab. 4 Rozdělení délek stokové sítě dle materiálu. (zdroj: Obec Lipůvka)

Materiál	Délka
[-]	[m]
Beton	5 487.2
Železobeton	905.1
Sklolaminát	256.1
PP	1 265.3
PVC	505.1
PE	621.9
<b>Σ</b>	<b>9 040.6</b>

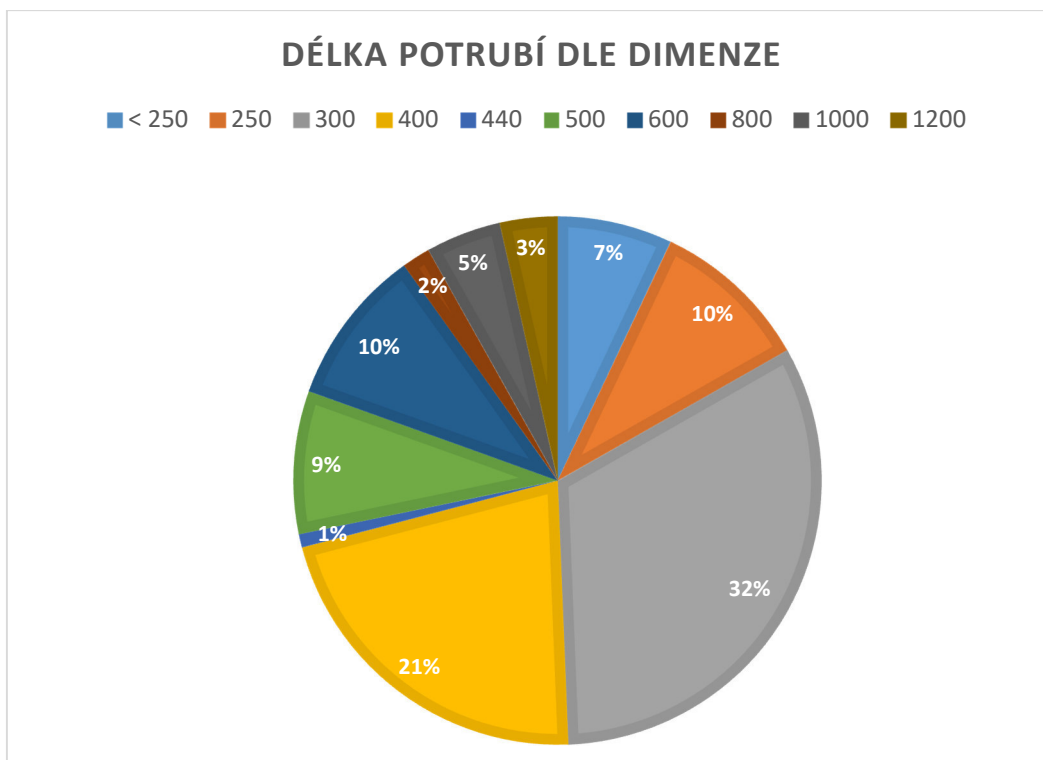


Obr. 58 Rozdělení délek stokové sítě dle materiálu. (zdroj: Obec Lipůvka)

Tab. 5 Rozdělení délek stokové sítě dle dimenzí. (zdroj: Obec Lipůvka)

Dimenze	Délka
[mm]	[m]
< 250	636.5
250	881.0
300	2 944.8
400	1 949.6
440	74.9
500	790.2
600	871.0
800	157.3
1000	417.1
1200	318.4
<b>Σ</b>	<b>9 040.6</b>





Obr. 59 Rozdělení délek stokové sítě dle dimenzí. (zdroj: Obec Lipůvka)

#### 4.2.1 Vírový separátor

Separátor odpadních vod za deštných průtoků je situován v jižní části obce. Do separátoru je zaústěna hlavní kmenová stoka „A“.

Separátor byl navržen s vířivým režimem, výpočtem na VUT v Brně. Průměr separátoru  $d = 6,5$  m, objem  $V = 105$  m<sup>3</sup>, přítok DN 1000, spodní odtok DN 200, přelivná hrana délky  $L = 8$  m. Separátor můžeme vidět na následujících obrázcích. [24]



*Obr. 60 Objekt se separátorem odpadních vod.*

Na Obr. 61 můžeme vidět vtokové potrubí DN 1000, odtokový otvor osazený vtokovou mříží a přelivnou hranu rozdělenou na tři části.



*Obr. 61 Separátor odpadních vod.*

Ze separátoru jsou odpadní vody odváděny hlavním sběračem „A“ do stokového systému města Kuřim. Sběrač byl vybudován ve druhé polovině devadesátých let minulého století z potrubí PVC DN 300 o celkové délce 1904 m. Za výtokem ze separátoru se nachází měrný žlab, měřící proteklý objem odpadních vod z obce. Odlehčené odpadní vody jsou ze

separátoru vedeny do vodoteče Lipůvka. Tamtéž je zaústěn i obtok separátoru, v obou případech se jedná o ŽB potrubí DN 1000. [24]

#### 4.2.2 Vodní recipient

Základní údaje o vodním recipientu:

Vodní tok Lipůvka - pod separátorem a vodní tok Kuřimka - jihovýchodní část obce.

Název recipientu:	Kuřimka, Povodí Svatky, Povodí Moravy
Číslo hydrologického pořadí:	4 - 15 - 01 -142
Plocha povodí:	33,370 km
Délka toku:	12,5 km
Správce toku:	Povodí Moravy, s.p.
N-leté průtoky $Q$ [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] :	$Q_5 = 9,9 m^3 \cdot s^{-1}$ , $Q_{20} = 18,3 m^3 \cdot s^{-1}$ , $Q_{100} = 32 m^3 \cdot s^{-1}$ . [24]

#### 4.3 PODKLADY PRO TVORBU

Běžně není standardem, že obec, potažmo provozovatel, má dokonalý přehled o síti. Tím jsou myšleny výkresové dokumentace jednotlivých větví či řadů, což je nejčastěji zapříčiněno dobou výstavby. Velká část kanalizační infrastruktury v obcích totiž byla budována v takzvaných akcích Z, a tedy povětšinou bez jakékoliv dokumentace a z materiálu, který byl zrovna v daném místě k dispozici. Právě z těchto dob běžně pochází problémová místa, jako jsou ta se zápornými spády, nelogické sledy profilů či absence šachet. Následné řešení problémů s kapacitou, které časem provozu vyšly na povrch, se provádělo cestou nejmenšího odporu, tedy například různými propoji mezi větvemi.

Pro získání chybějících údajů se provádí takzvaná pasportizace sítě. Ta obnáší otevření každé šachty, její polohopisné a výškopisné zaměření (dno a poklop), náčrt vstupujících a vystupujících potrubí včetně dimenzí a materiálů. Následně se spojí data z pasportizace s daty, která jsou k dispozici z projektových dokumentací. Výstupem je pak jeden situační výkres obsahující celou stokovou síť. V současnosti již obce, zejména ty expandující, těmito podklady disponují, což je případ i obce Lipůvka.

Pokud nemáme dostatečné podklady pro tvorbu hydraulického modelu neboli modelu trubního vedení a objektů na síti, k doplnění poslouží rovněž osobní návštěva lokality.

Podklady pro tvorbu srážko-odtokového simulačního modelu můžeme rozdělit například na *získané* a *vytvořené*, detailněji pak na *geodetické*, *hydraulické* a *hydrologické*.

Podklady a data o stokové síti či srážko-odtokového povodí byla v našem případě získána od:

- majitele infrastruktury - obec Lipůvka;
- provozovatele stokové sítě – VAS, a.s., divize Boskovice;

- projekční kanceláře – VH atelier, spol. s.r.o.

#### 4.3.1 Geodetické podklady

Geodetické podklady patří mezi nejdůležitější zdroje dat, zejména pro tvorbu hydraulického modelu stokové sítě. Výškopisné zaměření zájmové oblasti však také může posloužit k detailnějšímu popisu povodí, tedy modelu hydrologickému. Nepostradatelná data jsou:

- nadmořské výšky poklopů a den šachet a objektů;
- délky jednotlivých trubních úseků.

V našem případě byla tato data součástí výkresové dokumentace z provedené pasportizace celé kanalizační sítě, která byla zhotovena před rekonstrukcí v roce 2008.

#### 4.3.2 Hydraulické údaje

Hydraulické údaje slouží zejména k definování trubních úseků. Mezi tyto patří:

- tvar průřezu potrubí,
- dimenze potrubí,
- materiál potrubí- Manningův součinitel  $n$ ,
- ztrátový součinitel na vtoku a výtoku z potrubí.

Informace o potrubí byly rovněž získány z výkresové dokumentace. Ztrátový součinitel  $n$  byl stanoven odborným odhadem na základě vizuálního zjištění stavu a přihlédnutí do tabulky doporučených hodnot. Ta se nachází v uživatelském manuálu simulačního programu SWMM. Z uživatelského manuálu byly rovněž převzaty i doporučené hodnoty ztrátového součinitele vtoku a výtoku z potrubí.

Tab. 6 Použité hodnoty Manningova součinitele drsnosti  $n$  před kalibrací.

Materiál	$n$ [-]
beton, železobeton	0.014
sklolaminát	0.01
plasty	0.01

Mezi další hydraulické podklady patří data z měření na stokové síti, které si provádí provozovatel či vlastník infrastruktury. Na konci stokové sítě v obci Lipůvka je prováděno měření proteklého objemu. Jak již bylo zmíněno, jedná se o měrný žlab za separátorem odpadních vod. Toto zařízení obsahuje součtové počítadlo, ze kterého jsou běžně co 2-4 dny obsluhou opísány hodnoty.



### 4.3.3 Hydrologické podklady

Mezi hydrologické podklady potřebné pro tvorbu simulačního modelu patří zejména *hydrotechnická situace*.

Hydrotechnická situace slouží k popisu odtokových poměrů z povodí stokové sítě. Tvorbou hydrotechnické situace se rozumí diskretizace ploch, na kterých vzniká povrchový odtok a který je sveden do stokové sítě. Povodí stokové sítě je tedy rozděleno na dílčí povodí (subpovodí), která se mohou lišit svými vlastnostmi. Jedná se zejména o:

- plochu,
- koeficient odtoku  $\Psi$ ,
- dešťovou srážku.

Při užití menší míry schematizace se model rozšíří o data, která detailněji popisují transport vody do stokové sítě. Jedná se o šířku povodí, sklon terénu k stokové síti a detailní popis povrchu povodí. Popis povrchu povodí je možno rozšířit o metodu řešení infiltrace, data drsností jednotlivých druhů povrchu a prohlubní k zdržování vody. Definováním všech těchto parametrů dojde prakticky k vytvoření hydrologického modelu povodí.

#### *Tvorba hydrotechnické situace*

Dle ČSN 75 6101 patří mezi metody pro tvorbu hydrotechnické situace tzv. metoda ideálních střech a hydrologická metoda. [2]

V našem případě bylo přistoupeno k tvorbě hydrotechnické situace metodou hydrologickou, která lépe vystihuje skutečný stav povrchového odtoku v povodích a jeho zaústění do stokové sítě. K tvorbě hydrotechnické situace hydrologickou metodou je velmi vhodné (nutné) navštívit danou lokalitu a pochůzkou zjistit potřebné informace k tvorbě co nejpresnějšího modelu. Jedná se o lomy terénu, překážky odtoku, popis jednotlivých druhů povrchů, ze kterých je realizován povrchový odtok, popř. konzultace s občany. I velmi dobré podklady pro tvorbu hydrotechnické situace, ve formě DMT, ortofotomap, nemusí mít požadovaný efekt na přesnost bez osobní návštěvy lokality.

Po provedení pochůzky v obci a zakreslení (popsání) zjištěných skutečností byly některé vyplynulé nejasnosti konzultovány s odpovědnými osobami. V tomto případě se jednalo o zástupce provozovatele stokové sítě (VAS, a.s., divize Boskovice) a starostu obce Lipůvka. Hydrotechniku zájmového povodí můžeme vidět v příloze 01. Není zde přistoupeno k tvorbě hydrotechnické situace přesně dle ČSN 01 3462. Ta definuje podobu hydrotechnické situace při použití racionálních metod výpočtu. Dle mého názoru je tato podoba vhodná při použití metody ideálních střech, kdy jsou povodí velká a bez množství lomů. V našem případě je však použita metoda hydrologická a požadavky normy na vzhled hydrotechnické situace by zde působili nepřehlednost.

## 4.4 TVORBA SIMULAČNÍHO MODELU

Jak již bylo zmíněno, k tvorbě simulačního modelu a provádění simulací byl použit software SWMM. Jeho nevýhodou při tvorbě modelu je nemožnost importu dat ve formátech, v kterých máme podkladní data o síti běžně k dispozici, tedy *.dwg* či *.dxf*. SWMM umožňuje kreslení modelu přímo v programu. Tato možnost není špatná zejména pro malé modely. Je možno podložit si pracovní plochu předpřipraveným výkresem a následně jej obkreslit prvky (objekty) a nadefinovat je v programu SWMM. Je však zřejmé, že při této práci roste s velikostí modelu možnost vzniku chyb. Jsou však možnosti, jak nainportovat vytvořenou kostru modelu do SWMM. Pokud vyloučíme možnost zakoupení komerční verze pracující s výpočetním jádrem SWMM (například PCSWMM), je zde možnost využití add-in tools do programu AutoCAD. Ty umožňují export ve formátu *.inp*. Další možnosti, z mého pohledu nejsložitější, je převod dat pomocí textových editorů na formát *.inp*, který je v programu SWMM možné otevřít. V našem případě byla kostra modelu (úseky, uzly, elementární stoková povodí) vytvořena v programu AutoCAD a pomocí jednoho z doplňků vyexportována ve formátu *.inp*. Veškeré další práce (např. definování složitějších objektů) byly prováděny přímo v programu SWMM. Vytvořený model stokové sítě a srážko-odtokového povodí před importem do SWMM viz příloha 01.

### 4.4.1 Schematizace modelu

Schematizace je proces zjednodušení topologie sítě. Může se jednat např. o vynechání úseků s malými dimenzemi, vynechání podružných stok, nahrazení několika úseků jedním ekvivalentním, zjednodušení popisu funkce složitějších objektů (např. oddělovací komory, čerpacích stanic vírových separátorů či čistíren odpadních vod). [3]

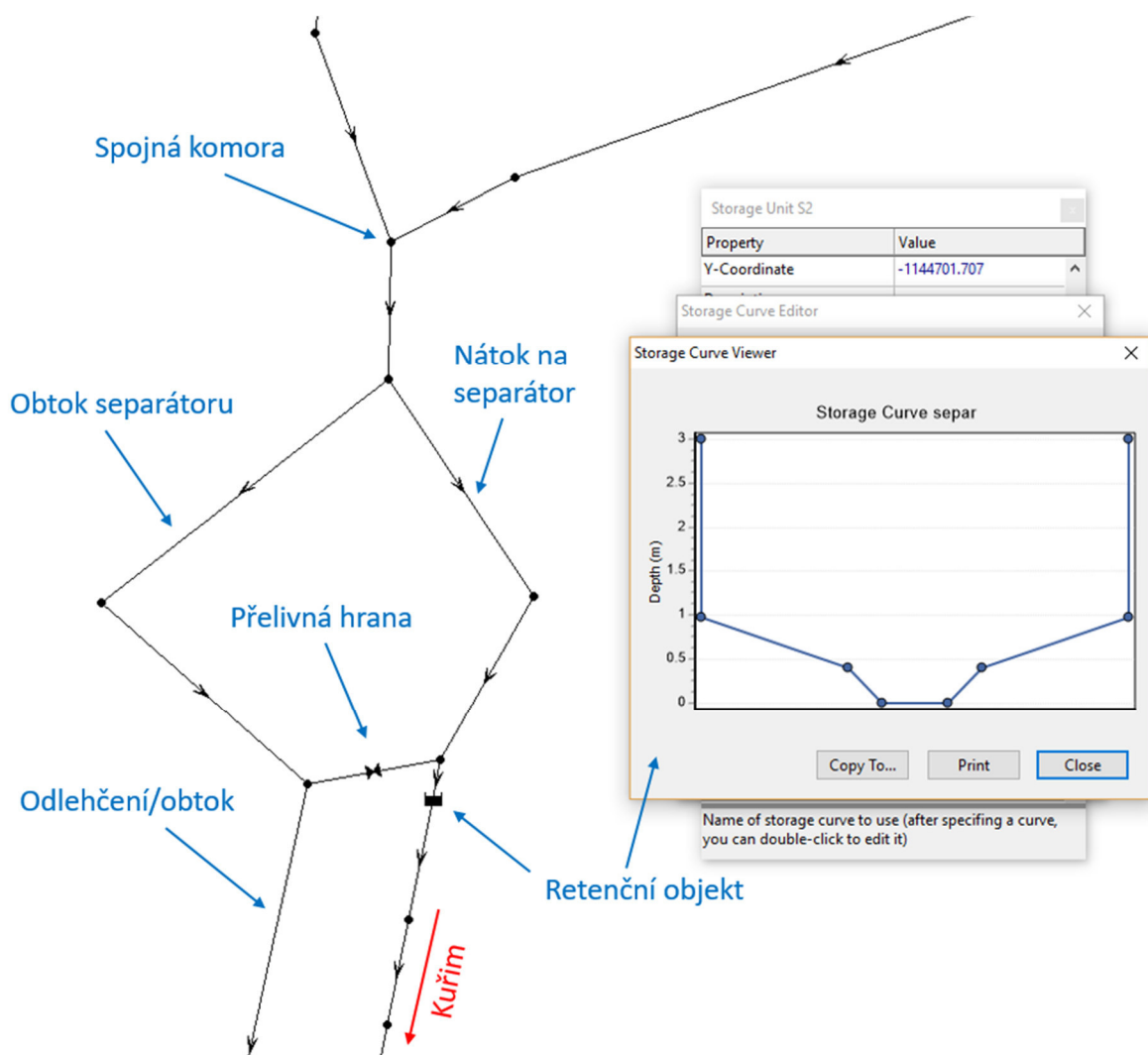
#### *Uzly a úseky*

Co se týče podrobnosti modelu stokové sítě Lipůvky, ten obsahuje drtivou většinu úseků i uzlů dle získaných podkladů. Model neobsahuje pouze dešťové stoky, které jsou volně vyústěny v obci a odpadní vody z nich tak nedotékají na separátor. Případně koncové krátké úseky a uzly, které nebyly dostatečně definovány a odhadování dimenzí či extrapolace výšek k jejich obsažení v modelu by neměla vliv na výsledek. Splaškové odpadní vody z nově vybudované stoky směrem na Svinošice s čerpací stanicí jsou definovány jako bodový vtok.

#### *Vírový separátor*

Vírový separátor, nacházející se v obci, program SWMM neumožňuje definovat jako jeden objekt. Běžně se tedy složité objekty definují kombinací objektů základních, kterými programy pro tvorbu modelů disponují. Vírový separátor je tedy definován jako *retenční uzel*, přelivná hrana je definována jako *úsek přeliv* a je předsazena před retenční uzel.

Nadefinovaný objekt separátoru můžeme vidět na následujícím obrázku. Obrázek obsahuje v pravé části náhled na nadefinovaný retenční objekt v softwaru SWMM.



Obr. 62 Objekt separátoru odpadních vod nadefinovaný v SWMM.

### Bezdeštný průtok

V modelu je nadefinován také bezdeštný splaškový průtok. Zadané množství odpadních vod produkovaných v obci zde vychází z reálných hodnot a bylo stanoveno následovně. Ze získaných podkladů (červen až září) o proteklých objemech měřených měrným žlabem za separátorem byly vybrány hodnoty, které nebyly ovlivněny dešťovými průtoky. Z nich byl stanoven průměrný denní průtok. Ten byl následně rozpočítán do 8 okrsků dle počtu domů a byla mu přidělena křivka denní nerovnoměrnosti. Takto zadaný splaškový průtok vyvolává v místě měrného profilu výšku hladiny cca 2 cm, což odpovídá reálně naměřeným hodnotám.

Rozdělení splaškových oblasti viz příloha 02.

#### 4.4.2 Vytvořený model

Typy objektů, z kterých je model složen a jejich počty můžeme vidět v následující tabulce.

Tab. 7 Typy a počty objektů obsažené ve vytvořeném simulačním modelu.

Typ objektu	Počet
Uzly	209
Úseky	212
Povodí	128
Přeliv	1
Retenční objekt	1

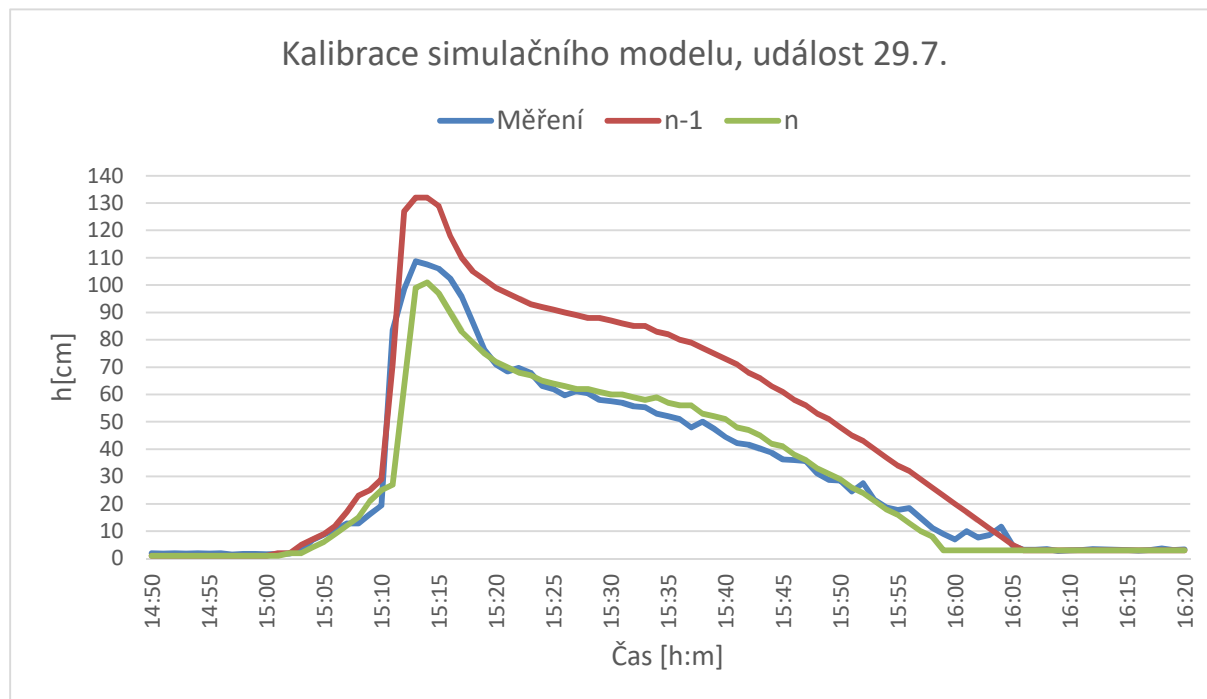
Charakteristiky úseků a uzlů jsou obsaženy v přílohách 04 a 05.

Po nadefinování všech objektů, vyskytujících se v modelu, bylo přistoupeno ke spuštění první simulace. Simulován byl srážko-odtokový proces na povodích a proudění vody v potrubí. Jako výpočetní metoda byla zvolena *dynamická vlna*. Popis této metody je uveden v odstavci 2.2.4. Infiltrace je řešena metodou Curve-Number. Časový krok výpočtu nastaven na 1 vteřinu, výsledky jsou prezentovány po minutách.

#### 4.4.3 Kalibrace a verifikace vytvořeného simulačního modelu

Po nadefinování modelu stokové sítě a povodí bylo přistoupeno k jeho kalibraci. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.2, model byl kalibrován na výšku hladiny v měrném profilu. Jako nejvhodnější, pro umístění průtokoměru, bylo zvoleno místo, které bylo při deštích s vyšší intenzitou ovlivňováno zpětným vzdutím vody ze separátoru. Od tohoto faktu se také odvíjel výběr srážkových epizod, použitých pro kalibraci a verifikaci modelu. Byly vybrány deště s vysokou intenzitou, které ve skutečnosti prověří kapacitu stokové sítě. Tedy deště, podobající se průběhem dešťům, kterými bude stoková síť posuzována, což je cílem práce. Při kalibraci bylo cílem nastavit správné parametry jak povodím, které produkují povrchový odtok a potrubí, kterým voda putuje, tak hydraulicky složitěmu objektu na konci sítě – vírovému separátoru. Takovéto objekty se běžně v 1D modelech neobjevují, jelikož není zpravidla možné vystihnout jejich chování pro všechny typy vstupů (dešťů). Z hlediska přesnosti je vhodnější modelovat tyto objekty ve 3D (např. software Flow3D) a výstupy z těchto modelů vkládat do 1D modelů ve formě okrajových podmínek. To je však problematika pro samostatnou diplomovou práci. Pokud má být tento objekt zahrnut v 1D modelu, na jeho správném chování se musí podílet i nastavení úseků a povodí. Jelikož byl tedy model kalibrován na deště o vysoké intenzitě, bylo zjištěno, že při simulacích násobných dešťů nízkých intenzit s delší dobou trvání, není dosahováno kalibrovaným modelem takové shody jako u dešťů s vysokou intenzitou.

Kalibrace byla prováděna v krocích, kdy se měnilo nastavení prvků sítě za účelem přiblížení se skutečným hodnotám výšky hladiny v daném čase. Při vyhodnocování průběhu kalibrace se zejména vizuálně porovnávaly reálné naměřené a simulované průběhy výšek hladin v místě měrného profilu. To znamená, že v jednom grafu se nacházela jak křivka naměřených (skutečných) hodnot (ozn. *Měření*), tak křivky dat z předchozí ( $n-1$ ) a současné ( $n$ ) simulace. Krok simulace můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 63 Postup při kalibraci.

Při kalibraci byly měněny zejména parametry povodí. Na nich totiž vzniká povrchový odtok zaústěný do kanalizace. Parametry povodí ovlivňují zejména jeho celkový objem, ale i rozložení v čase. Čas dotoku ovlivňují také potrubní úseky. Co se týče měněných parametrů povodí k dosažení shody mezi reálnou a modelovou maximální výškou hladiny, k hrubému přiblížení byl měněn podíl nepropustných ploch. Jemnější doladění pak bylo provedeno změnou parametrů ploch nezpevněných, tedy půdních. Tento parametr umožňoval také jemné ladění doby dotoku při klesání výšky hladiny. O nastavení co nejpřesnějšího nástupu výšky hladiny na začátku deště se stará zejména drsnost potrubí. Již před započítáním kalibrace byl modelem produkován velmi podobný průběh hladiny (tvar křivky) reálnému stavu. To můžeme vidět na předcházejícím obrázku, kdy křivka  $n-1$  je získána jednou z prvních simulací při kalibraci. Z mého pohledu to bylo díky přesným podkladům o stokové síti a zřejmě i vytvořené hydrotechnické situaci. Při kalibraci pak bylo zapotřebí naladit nástup hladiny, její maximum a konec dotoku. Přesto pro mě nebyla kalibrace otázkou „jednoho dne“. Jednak z důvodu dosavadních zkušeností s touto činností, tak ne vždy jednoduchou úpravou parametrů v programu, dobou výpočtu a exportu dat do tabulkového editoru k porovnání změny mezi simulacemi atd.

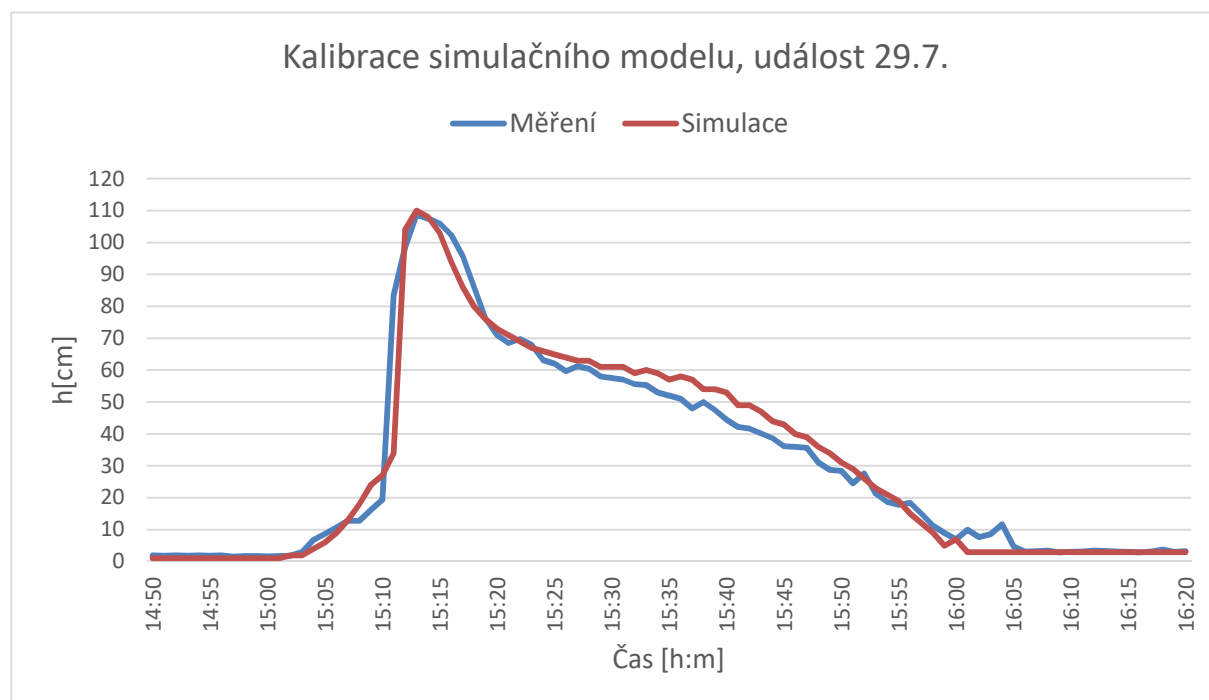
K vyčíslení přesnosti kalibrace a verifikace byl použit vztah (3.1) pro výpočet relativní odchylky  $r_r$ . Tento vzorec se však používá nejčastěji pro stanovení odchylky proteklého objemu, vyjadřující jeho podhodnocení či nadhodnocení. Z mého pohledu pak má v tomto případě o něco vyšší vypovídací hodnotu odchylka průměrná.

$$r_p = \frac{|y_{sim} - y_{mer}|}{y_{mer}} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

kde  $y_{sim}$  ... vypočtená hodnota [m],  
 $y_{mer}$  ... naměřená hodnota [m],  
 $r_p$  ... průměrná odchylka [%]. [3]

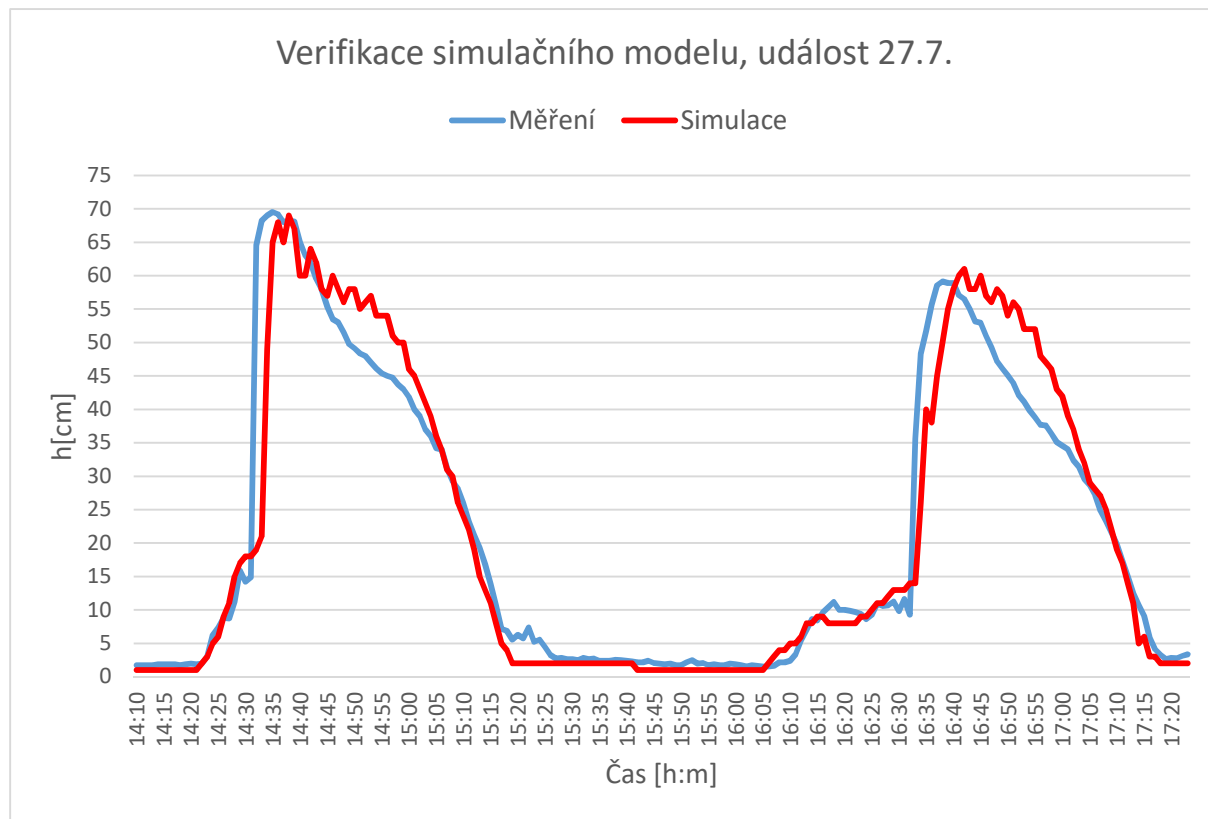
Při stanovování odchylky se postupovalo následovně. V každé minutě byl procentuálně vyjádřen rozdíl mezi naměřenou a vypočtenou hodnotou. Tyto minutové rozdíly jsou u průměrné odchylky vyjádřeny v absolutní hodnotě, kdežto u odchylky relativní ne. Následně byla stanovena odchylka celé události jako průměr minutových.

Jakékoliv číselné vyjádření však není až tak vypovídající o úspěšnosti kalibrace na výšku hladiny. Zde je důležitá zejména podobnost křivek průběhu výšky hladiny, časová synchronnost, zachycení začátku (nástupu) a špičky hladiny. Z informativního hlediska jsou však uvedeny hodnoty průměrné i relativní odchylky. Na následujícím obrázku můžeme vidět dosažené přesnosti kalibrace. Relativní odchylka zde byla stanovena jako  $r_r = 1,7 \%$ , průměrná odchylka  $r_p = 17,2 \%$ .



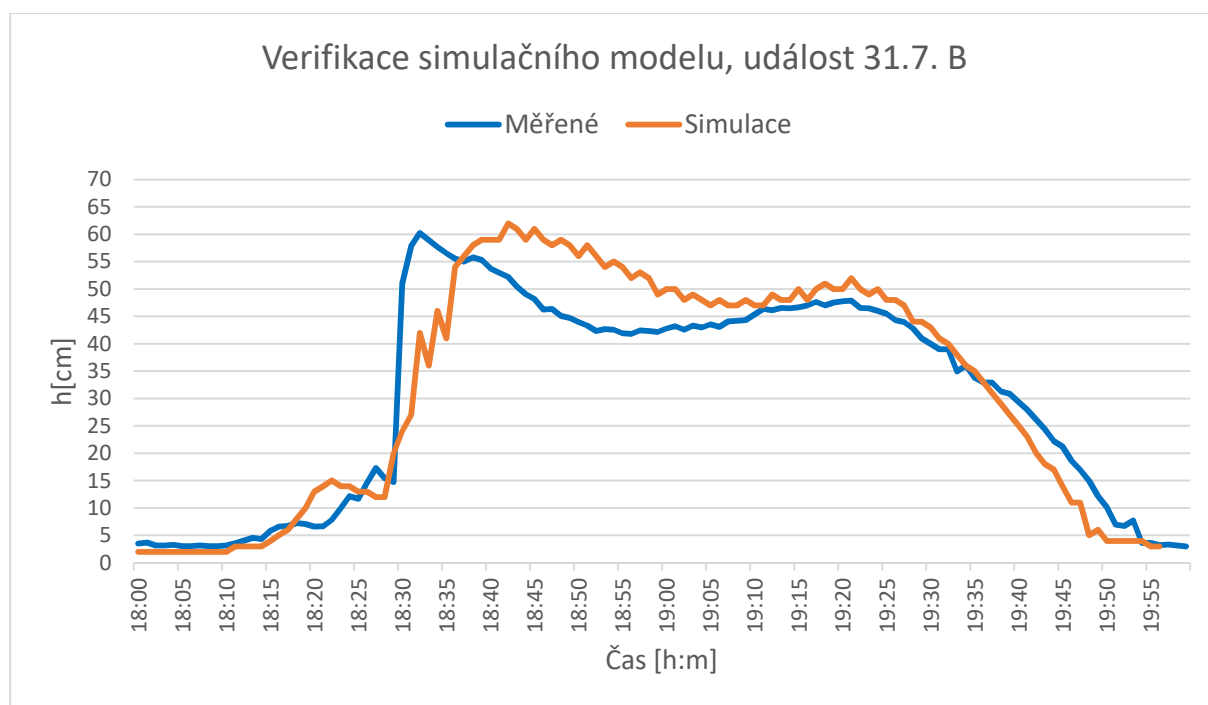
Obr. 64 Kalibrace simulačního modelu.

Verifikace byla provedena na dvou událostech. První z nich je událost z 27.7. Na následujícím obrázku můžeme vidět, že simulační model celkem přesně vystihl počátek a konec dotoku. Maximální hodnoty obou špiček jsou dosaženy se zpožděním, avšak jejich hodnoty jsou téměř shodné s naměřenými. V tomto případě činí relativní odchylka  $r_r = 3,1 \%$ , průměrná odchylka  $r_p = 23,5 \%$ .



Obr. 65 Verifikace simulačního modelu, událost 27.7.

K verifikaci byla dále použita událost z 31.7. Průběh výšky hladiny naměřené a simulované můžeme vidět na následujícím obrázku. Modelem vypočítaná maximální výška hladiny je zde dosažena s výraznějším zpožděním oproti předchozím případům, její hodnota je však opět velmi podobná výšce změřené. Relativní odchylka je zde  $r_i = 3,3 \%$ , průměrná odchylka  $r_p = 21,9 \%$ .



Obr. 66 Verifikace simulačního modelu, událost 31.7. B.



## 5 POSOUZENÍ STOKOVÉ SÍTĚ

Po kalibraci simulačního modelu bylo přistoupeno k hydraulickému posouzení stokové sítě. Účelem je zjistit, zda a případně kde, se na stokové síti vyskytuje nedostatečně kapacitní potrubí. Toto je zjišťováno zatěžováním simulačního modelu takzvanými zátěžovými srážkami.

### 5.1 ZÁTĚŽOVÉ SRÁŽKY

K posouzení stokové sítě byly vybrány zátěžové srážky s ohledem na legislativní doporučení dle ČSN 75 6101, jež jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 8 Doporučené četnosti výskytu a periodicity zátěžových dešťů. [2]

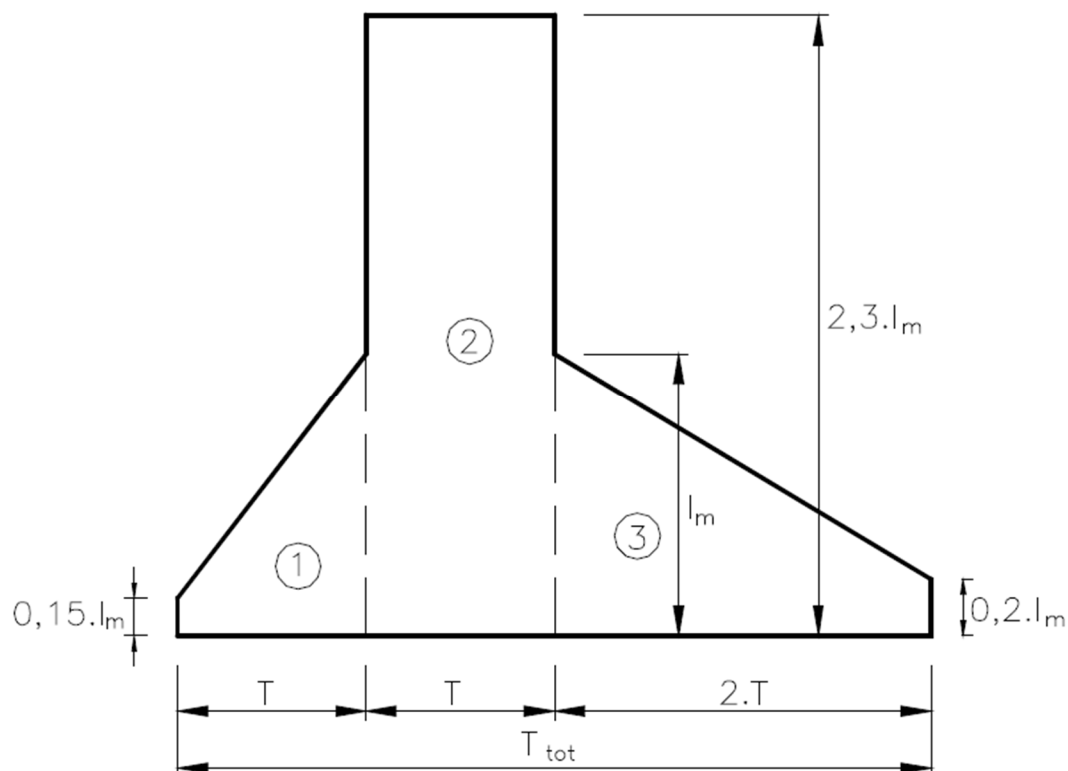
Druh lokality	Četnost výskytu návrhových dešťů	Periodicita výskytu návrhových dešťů $p$ [rok <sup>-1</sup> ]
Venkovská území	1 x za rok	1
Obytná území	1 x za 2 roky	0,5
Městská centra, území průmyslových a drobných provozů	1 x za 5 let	0,2

Vzhledem k druhu zájmové lokality byly k posouzení vybrány dva deště o periodicitě  $p=0,5$  s dobou trvání  $T=20$  a  $T=60$  minut. Intenzity těchto dešťů jsou převzaty z Truplových tabulek [30] pro nejbližší lokalitu, již je Brno. Hodnoty náhradních intenzit dešťů můžeme vidět v tabulce č. 9, z níž bylo čerpáno.

Tab. 9 Náhradní intenzity dešťů. [30]

doba trvání deště $t$ [min]	intenzita deště [mm·hod <sup>-1</sup> ] při periodicitě $p$						
	5	2	1	0,5	0,2	0,1	0,04
5	45,0	64,8	79,2	95,4	115,9	132,1	152,6
10	29,4	45,7	58,7	72,7	90,4	103,7	121,3
15	22,2	35,6	46,4	58,0	73,1	85,0	100,1
20	17,4	28,5	37,4	47,2	60,1	69,8	83,2
30	12,4	20,7	27,4	34,7	45,0	52,6	62,6
40	9,8	16,5	22,0	28,0	36,4	42,8	51,1
60	6,9	11,8	15,8	20,3	26,6	31,5	37,8
90	4,8	8,4	11,3	14,7	19,4	23,0	27,8
120	3,7	6,6	8,9	11,6	15,4	18,3	22,2

Ke konstrukci těchto srážek byl použit syntetický Šifaldův déšť, který více odpovídá svým průběhem dešťům reálným. Jeho konstrukci můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 67 Syntetický Šifaldův déšť. [14]

Třetím deštěm, použitým k posouzení, byl stanoven reálně zachycený déšť v době prováděné měrné kampaně. Jedná se o déšť z 29.7., jehož celkový úhrn při porovnání s Truplovými tabulkami odpovídá téměř přesně dešti o periodicitě  $p=0,5$  s dobou trvání  $T=15$  minut. Charakteristiky syntetických zátěžových srážek můžeme vidět v následující tabulce. Průběh deště číslo 3 můžeme vidět v kapitole 3.3.1: 4. Událost 29.7.

Tab. 10 Zátěžové srážky.

Déšť číslo	Periodicita	Doba trvání	Úhrn
	[rok <sup>-1</sup> ]	[min]	[mm]
1	0.5	20	15.72
2	0.5	60	20.34
3	viz kapitola 3.3.1		

## 5.2 VYHODNOCENÍ

Jak již bylo zmíněno, hlavním účelem posuzování stokové sítě je zjištění, zda a v jaké míře se zde vyskytuje kapacitní problém. Předem bylo předpokládáno, že zaplněno bude potrubí v blízkosti vírového separátoru na konci stokové sítě. V tomto případě se však nejedná o nekapacitní úsek. Nebylo však známo, do jaké vzdálenosti protiproudě

od separátoru až případné vzduší ovlivňuje kapacitu stoky a potrubí je zaplněno či zda se v kterémkoliv jiném úseku stokové sítě nevyskytuje problém s kapacitou.

Simulačními modely je obecně rovněž možno kontrolovat rychlosti proudění v jednotlivých úsecích, což umožňuje vytipování míst náchylných k zanášení sedimenty, nebo naopak míst kde může docházet k degradaci materiálu z důvodu působení vysokých rychlostí proudění. V našem případě byl však model tvořen k posouzení kapacity stokové sítě a nedá se tedy použít k stanovení rychlostí při bezdeštném stavu. Kapitola je však pro zajímavost doplněna o posouzení maximálních rychlostí proudění.

Vyhodnocení výstupů vypočítaných simulačním modelem je v následujících kapitolách provedeno pro kapacitu úseků a pro rychlosti proudění v úsecích stokové sítě.

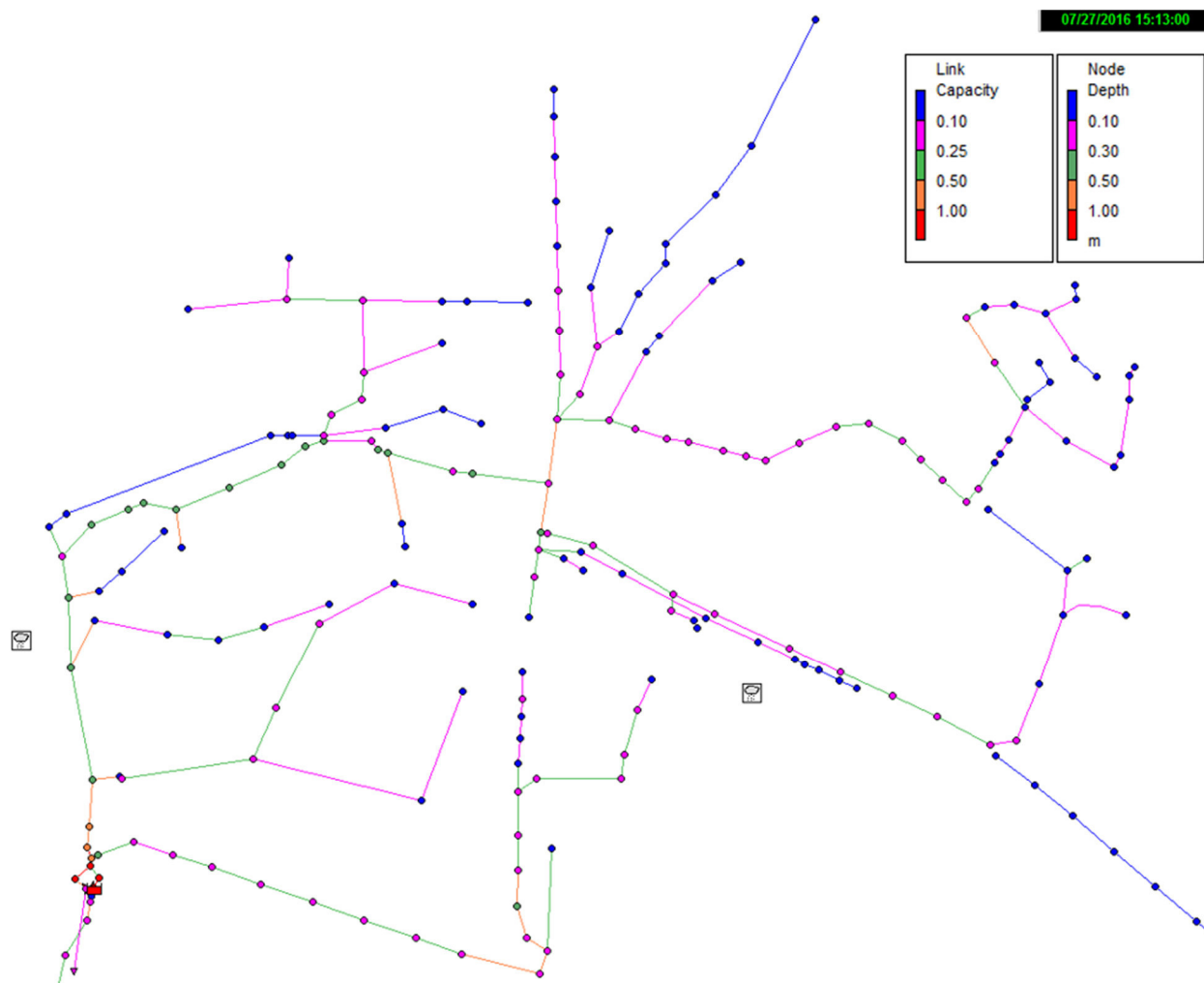
### 5.2.1 Posouzení kapacity stokové sítě

Tato podkapitola je členěna dle jednotlivých zátěžových srážek, pro něž je vždy provedeno vyhodnocení kapacity z hlediska průtoků a výšek plnění. K prezentaci výsledků jsou využity možnosti softwaru SWMM. Ten umožňuje export vypočtených výsledků v různých formách. V našem případě je využit celkový pohled na síť, kdy jsou uzly a úseky barevně rozlišeny dle hodnoty proměnné (např. kapacita u úseků), dále podélný profil znázorňující plnění stoky před separátorem odpadních vod a vyexportovaná tabulka s dosaženými maximy pro celou síť.

#### Děšť č. 1

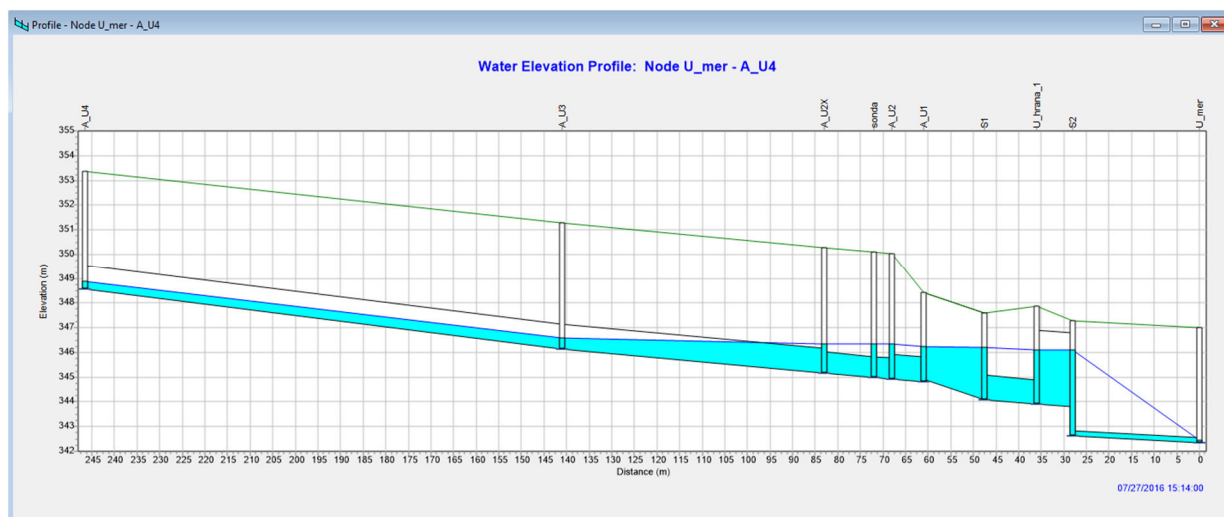
První zátěžovou srážkou je syntetický Šifaldův déšť. Charakteristika deště:  $p = 0,5$ ;  $T = 20$  min;  $i = 47,2$  mm·hod<sup>-1</sup>.

Na následujícím obrázku můžeme vidět vyexportovaný model sítě s barevným rozlišením úseků a uzlů sítě. Zabarvení úseků se odvíjí od jejich plnění. Škálu barev k danému plnění můžeme vidět v legendě s názvem *Link Capacity*, kdy zaplněné potrubí nabývá červené barvy (hodnota 1). Zabarvení uzlů se odvíjí od výšky hladiny vody v nich. Legenda barev uzlů k výškám hladiny má název *Node Depth* a hodnoty jsou v metrech. Export je proveden pro 13. minutu deště a znázorňuje zde maximální hodnoty plnění zejména ve střední části obce. Z obrázku je patrné, že plnění v obci dosahuje hodnot mezi 25 a 50% a to zejména na stoce A a B.



Obr. 68 Vyhodnocení kapacity – dešť č. 1, pohled na celou síť.

Na následujícím obrázku můžeme vidět podélný profil nad separátorem odpadních vod. Profil je vyexportován v době nejvýraznějšího vzduť vody. Uzel S2 charakterizuje retenční objem vírového separátoru. Výška hladiny v tomto uzlu je omezena přelivnou hranou. Z obrázku je patrné, že při zatížení simulačního modelu deštěm č. 1 je potrubí zaplněno do vzdálenosti cca 70 metrů protiproudě od separátoru. V tomto úseku nastal tlakový režim proudění. Uzel označen A\_U2 zastupuje spojnou komoru, uzel A\_U2X zde představuje konec sanační vložky.



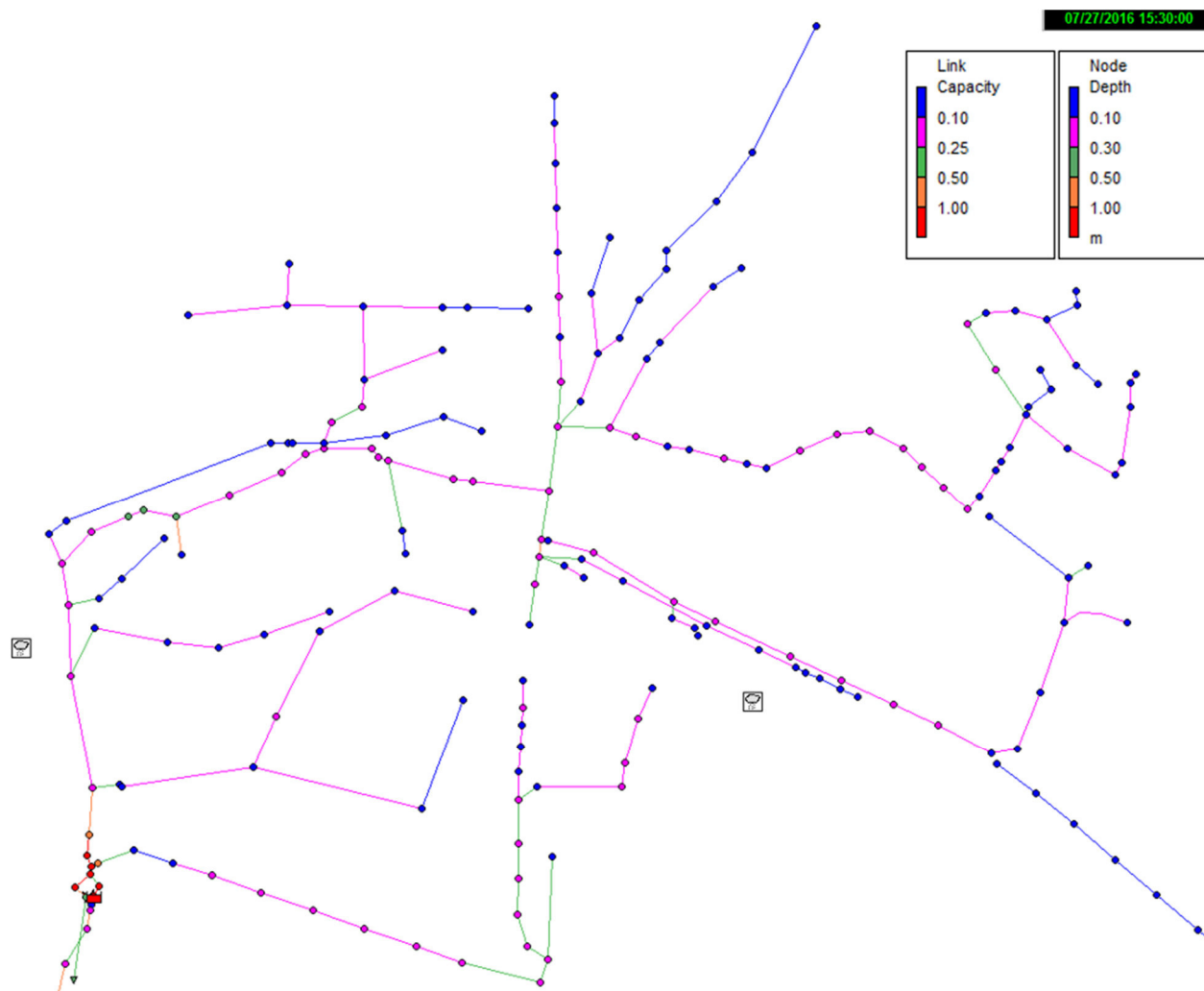
Obr. 69 Vyhodnocení kapacity – dešť č. 1, podélný profil nad separátorem.

Vypočtené hodnoty charakteristik úseků nacházejících se v modelu stokové sítě jsou obsaženy v příloze 06. Tabulka obsahuje data v čase dosažení maximálních hodnot plnění pro jednotlivé úseky.

## Děšť č. 2

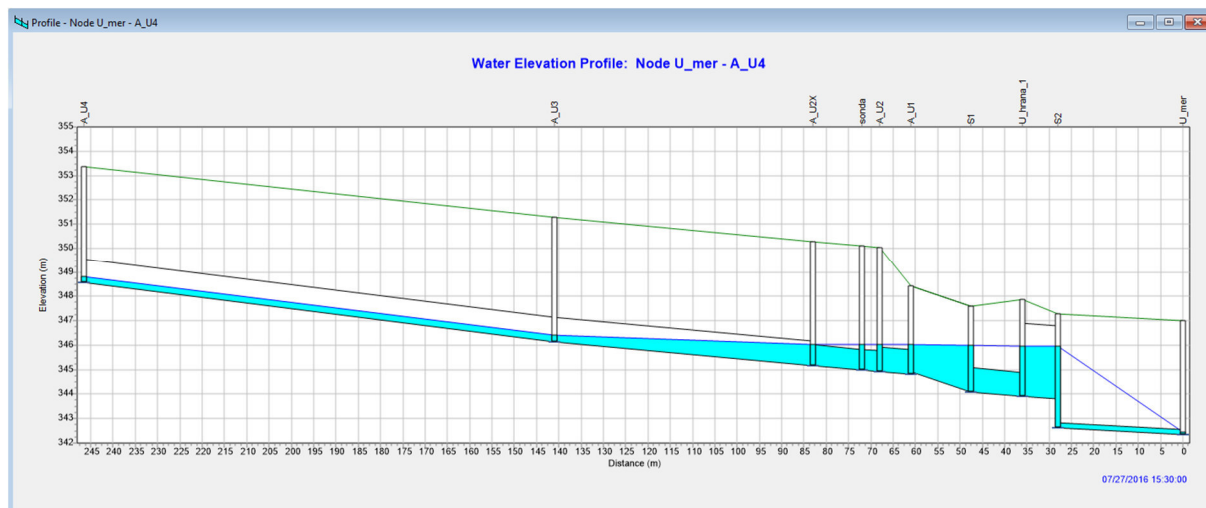
Druhou zátěžovou srážkou je rovněž syntetický Šifaldův dešť. Charakteristika deště:  $p = 0,5$ ;  $T = 60$  min;  $i = 20,3$  mm·hod<sup>-1</sup>.

Na následujícím obrázku můžeme vidět vyexportovaný model sítě s barevným rozlišením úseků a uzlů sítě. Zabarvení úseků se odvíjí od jejich plnění. Škálu barev k danému plnění můžeme vidět v legendě s názvem *Link Capacity*, kdy zaplněné potrubí nabývá červené barvy (hodnota 1). Zabarvení uzlů se odvíjí od výšky hladiny vody v nich. Legenda barev uzlů k výškám hladiny má název *Node Depth* a hodnoty jsou v metrech. Export je proveden ve 30. minutě trvání deště, kdy je stav na několik minut téměř ustálen z důvodu délky části deště bez změny intenzity.



Obr. 70 Vyhodnocení kapacity – déšť č. 2, pohled na celou síť.

Jelikož se jedná o déšť s nižší intenzitou, síť je zaplněna jen v jednotlivých úsecích nad 25%. Déšť vyvolává ve všech úsecích menší odezvu než déšť číslo 1, i když je jeho doba trvání delší. To potvrzuje, že je stoková síť náchylnější na deště s kratší dobou trvání a vyšší intenzitou. Maximální dosažený stav v úseku nad separátor odpadních vod můžeme vidět na následujícím obrázku. Z něj je zřejmé, že stejně jako v předchozím případě se dostává proudění do tlaku. Model však vypočítal, že vzduší dosahuje po uzel A\_U2X, tedy blíže než v případě minulém.



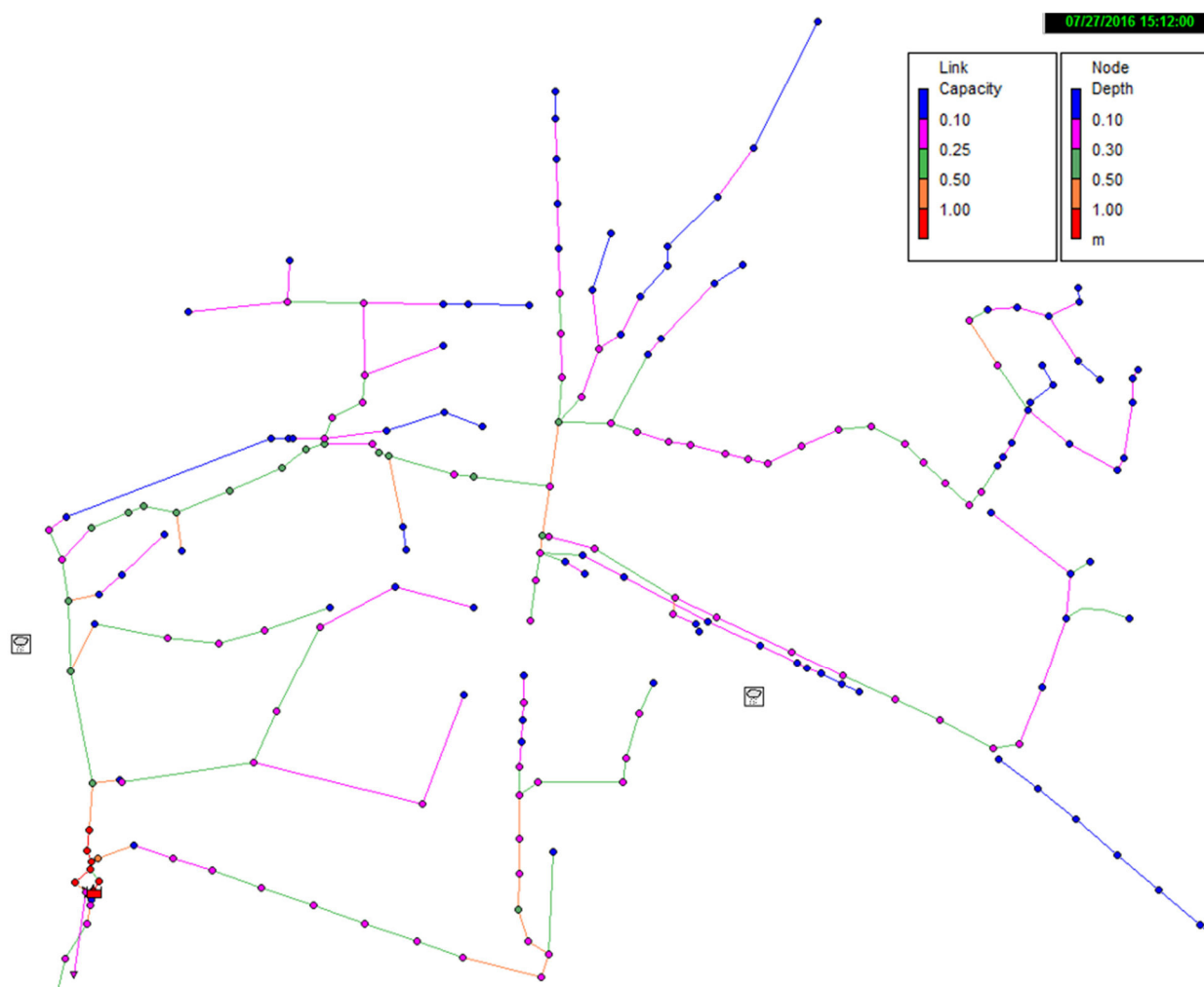
Obr. 71 Vyhodnocení kapacity – déšť č. 2, podélný profil nad separátorem.

Vypočtené hodnoty charakteristik úseků nacházejících se v modelu stokové sítě jsou obsaženy v příloze 07. Tabulka obsahuje data v čase dosažení maximálních hodnot plnění pro jednotlivé úseky.

### Déšť č. 3

Třetí zátěžovou srážkou byl zvolen zachycený déšť v měrné kampani ze dne 29.7. Celkový úhrn deště  $U=14,4$  mm, čímž odpovídá dle Truplových tabulek patnácti-minutovému dešti periodicity  $p=0,5$ . Tento déšť tak byl využit pro rozšíření výsledků posouzení stokové sítě. Jeho průběh je totiž skutečný, ne syntetický. Může tedy vyvolat jinou odezvu na síti, která je blíže skutečnosti. Graficky je průběh deště zobrazen v kapitole 3.3.1. na obrázku č. 32.

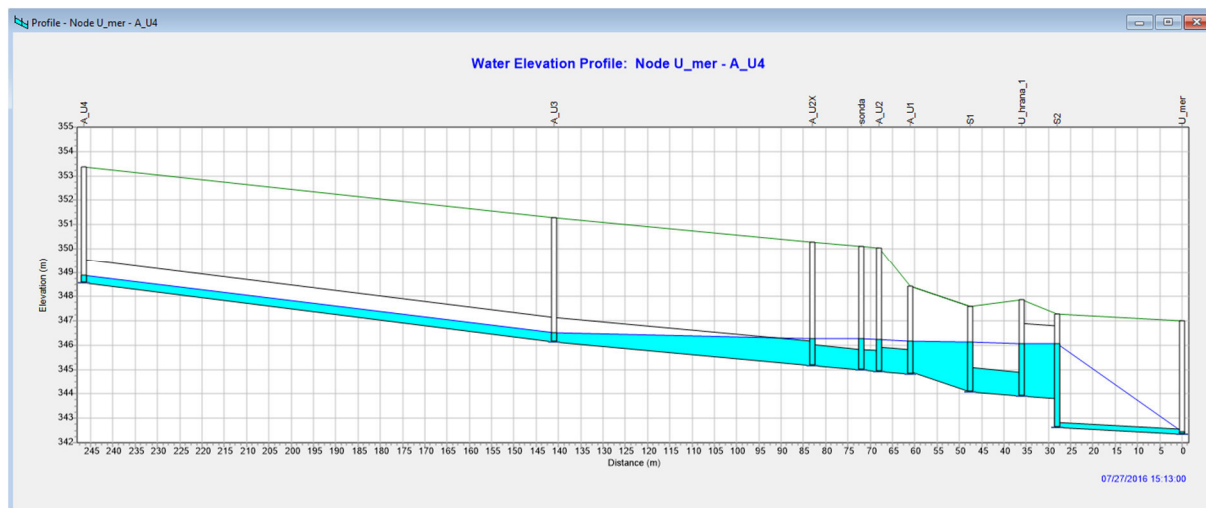
Na následujícím obrázku můžeme vidět vyexportovaný model sítě s barevným rozlišením úseků a uzlů sítě. Zabarvení úseků se odvíjí od jejich plnění. Škálu barev k danému plnění můžeme vidět v legendě s názvem *Link Capacity*, kdy zaplněné potrubí nabývá červené barvy (hodnota 1). Zabarvení uzlů se odvíjí od výšky hladiny vody v nich. Legenda barev uzlů k výškám hladiny má název *Node Depth* a hodnoty jsou v metrech. Export je proveden ve 12. minutě trvání deště, kdy jsou nejlépe zachyceny špičky na většině délky sítě.



Obr. 72 Vyhodnocení kapacity – déšť č. 3, pohled na celou síť.

Na obrázku můžeme vidět, že zátěžový déšť č. 3 vyvolává na síti podobné odezvy jako déšť č. 1. Vzhledem k tomu, že většina celkového úhrnu se realizuje za dobu cca 12 minut, plnění nad 25% se vyskytne ve větší části sítě. Problém s kapacitou se však ve středu obce neprojeví ani při zatížení sítě touto srážkou. Jediným místem, kde dochází k zaplnění potrubí, je tak jako u předchozích zátěžových stavů koncový úsek. Maximální dosažený stav v úseku nad separátor odpadních vod můžeme vidět na následujícím obrázku. Volná hladina se v tomto případě vyskytuje, podobně jako v prvním případě, přibližně 65 metrů protiproudě od separátoru.





Obr. 73 Vyhodnocení kapacity – déšť č. 3, podélný profil nad separátorem.

Vypočtené hodnoty charakteristik úseků nacházejících se v modelu stokové sítě jsou obsaženy v příloze 08. Tabulka obsahuje data v čase dosažení maximálních hodnot plnění pro jednotlivé úseky.

### 5.2.2 Posouzení rychlosti proudění

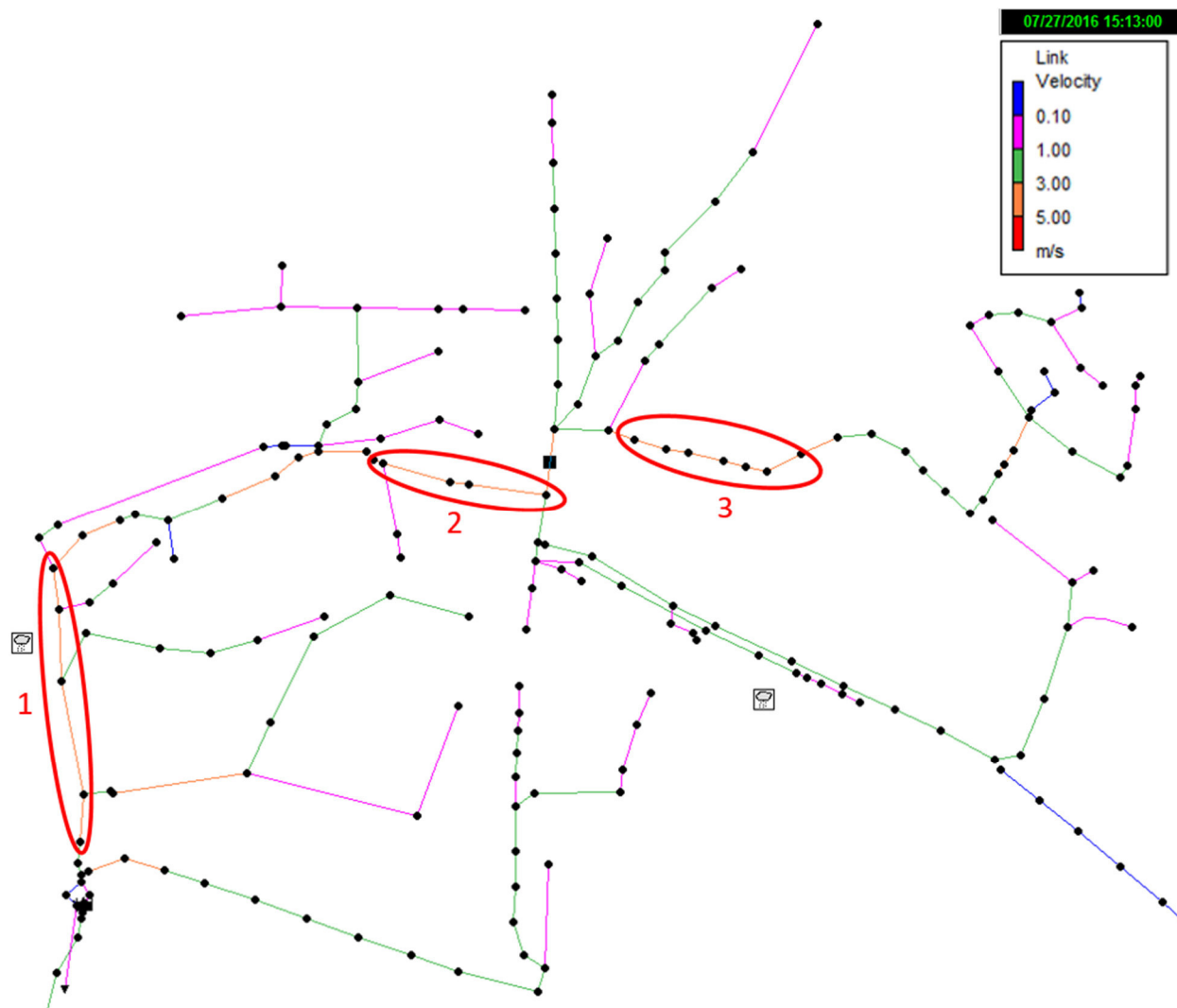
Dle legislativních doporučení by se rychlosti ve stokové síti měly pohybovat v určitém rozmezí, tak aby bylo zajištěno samočištění při bezdeštných průtocích, avšak aby při dešti nestoupala hodnota rychlosti nad hodnoty, při kterých dochází například k obrusu materiálu, strhávání vzduchu, disipace energie při přechodu mezi režimy proudění.

Jak již bylo zmíněno, simulačním modelem nejsou zjišťovány rychlosti při bezdeštném průtoku, jelikož k tomu model není přizpůsoben. Dle provozovatele stokové sítě se zde však nevyskytuje místo, kde by docházelo k problémům se zanášením potrubí. Simulačním modelem jsou tedy zjišťovány úseky s nadměrnými rychlostmi. Dle ČSN 75 6101 se mají v potrubích vyskytovat rychlosti proudění do  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , při dodržení určitých podmínek  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . U potrubí z prostého betonu či železobetonu by rychlost neměla přesahovat  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [2]

Dle výstupů z modelu, zejména rychlosti v betonových potrubích překračují doporučené maximální rychlosti. Ty jsou však překročeny pouze po dobu několika minut.

Pro prezentaci rychlostí proudění byl vybrán zátěžový déšť č. 1. Na obrázku č. 74 můžeme vidět celý model stokové sítě, kdy jsou úseky zbarveny dle rychlostí proudění. Model je exportován v době, která přibližně nejlépe zobrazuje maximální rychlosti v celé síti. V obrázku jsou zaznačeny vybrané úseky, kde je překročena doporučená rychlost. Jedná se o betonová potrubí, kdy je modelem stanovena nejvyšší rychlost v úseku označeném 1 (mezi uzly A\_U2X a A\_U6) cca  $v=3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , v úseku označeném 2 (mezi uzly A\_U17 až A\_U20) nabývá rychlost maximálních hodnot cca  $v=4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , v úseku označeném 3 (mezi uzly A8-1\_U1 až A8-1-1\_U7) nabývá rychlost maximálních hodnot

cca  $v=4,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pro všechny úseky platí, že jsou vystavovány působení vyšší rychlosti než  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  po dobu 10 až 15 minut.



Obr. 74 Vyhodnocení rychlostí – pohled na celou síť.

### 5.2.3 Shrnutí výsledků

Simulace za účelem hydraulického posouzení stokové sítě v obci Lipůvka byly prováděny se zátěžovými srážkami dle normativních předpisů platných na našem území (ČSN 75 6101). Charakteristiky zátěžových srážek byly voleny pro obytná území, čemuž odpovídá periodicita  $p=0,5$ . Jako zdroj dat byly použity tzv. Truplovy tabulky, z nichž byly převzaty náhradní intenzity dešťů s dobou trvání 20 a 60 minut a vytvořeny syntetické deště dle Šifaldy. Třetí použitou srážkou byla reálně zachycená srážka z průběhu měrné kampaně.

Srážkami byl postupně zatěžován vytvořený kalibrovaný simulační model. Úkolem bylo zjistit, zda se na stokové síti vyskytuje problém s kapacitou některých úseků. Provedená prezentace vypočtených rychlostí proudění v předchozí kapitole je zde

obsažena jen pro zajímavost a výsledky tedy nejsou zahrnuty v hodnocení sítě. Zjištěná skutečnost však může podnětem k provedení kamerových průzkumů k zjištění skutečného technického stavu potrubních úseků.

Podle předpokladu bylo zjištěno, že k zaplnění potrubí dochází na konci stokové sítě, v blízkosti vírového separátoru odpadních vod, což je důsledkem zpětného vzduť. Tuto skutečnost potvrdily simulace všech tří zátěžových stavů. Jelikož se jedná o úsek, který je situován mimo zástavbu na konci obce, terén se svažuje také směrem od zástavby, nehrozí zde žádné ohrožení majetku. Vzhledem k výšce přelivné hrany separátoru se nedá předpokládat, že by došlo k vzduť vody v kanalizačních šachtách do úrovně terénu. Zaplnění profilu vlivem zpětného vzduť však není považováno za hydraulické přetížení.[6]

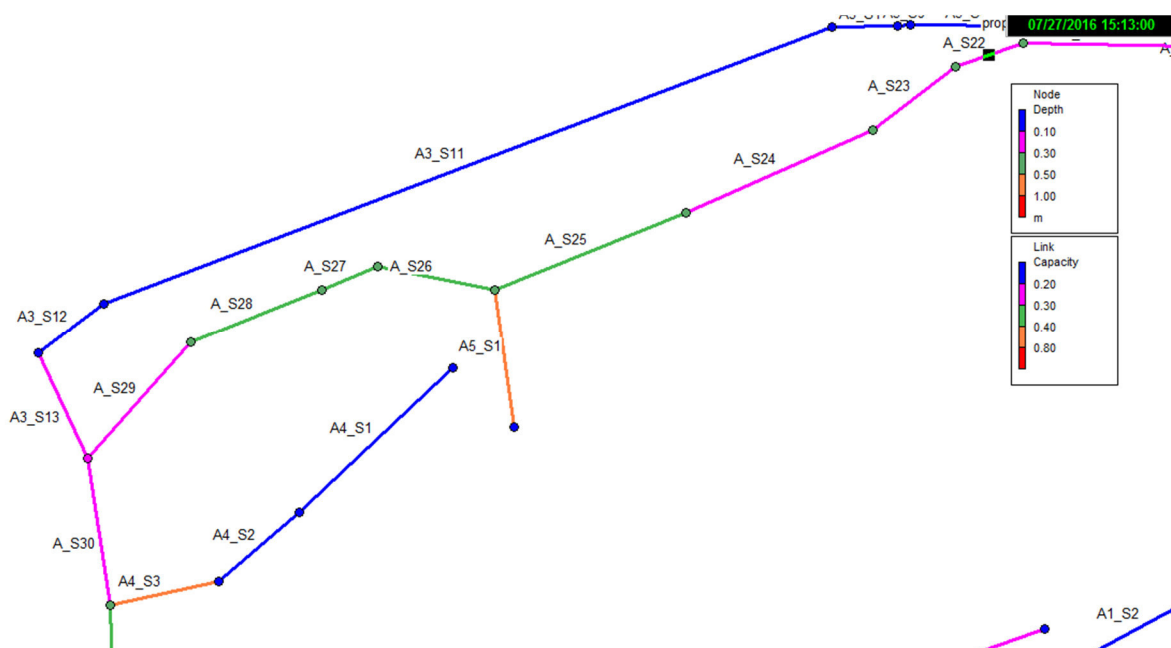
Co se týče kapacity stoky v zastavěné části obce, zde nebyly zjištěny kapacitní problémy. Sít' vykazovala vyšší hodnoty plnění při zatížení srážkami číslo 1 a 3, což potvrzuje vyšší náchylnost k zaplnění při kratších deštích vysoké intenzity. Při zatížení srážkou číslo 2, která měla dobu trvání nejdelší a intenzitu nejnížší, se v centru obce vyskytlo plnění do 25%. Při srážkách 1 a 3 bylo plnění v této části obce většinou kolem 50 %. Rekonstruovaná část stoky A, která je ze sklolaminátového potrubí DN 1200 je dostatečně kapacitní, maximální zjištěné plnění je zde do 39%. Navazující potrubí ŽB DN 1000, které vede parkem a dále kolem sběrného dvoru na separátor je po uzlu A\_U3 (napojení stoky A1) zaplněno do 35%.

Ze zjištěných výsledků je možné prohlásit stokovou sít' z kapacitního hlediska za vyhovující.

### 5.3 FINANČNÍ ANALÝZA

Jedním z cílů práce je na základě výstupů z provedených simulací doporučit k rekonstrukci kapacitně nevyhovující kanalizační úseky spolu s finančním podložením jejich technického řešení. Návrh dimenzí v nevyhovujících úsecích by měl být ověřen provedením simulací na kalibrovaném modelu stokové sítě. Jelikož však výsledky simulací ukazují, že se na stokové síti úseky s nedostatečnou kapacitou nevyskytují, je obsahem této kapitoly posouzení již rekonstruovaného úseku. Jedná se o úsek stoky „A“ v délce 258 metrů, mezi uzly A\_U6 a A\_U13.

V roce 2008 došlo k rekonstrukci tohoto úseku, kdy bylo, z důvodu havarijního stavu, nahrazeno potrubí ŽB DN 800 potrubím GRP DN 1200. Toto sklolaminátové potrubí bylo poproudě napojeno na stávající potrubí ŽB DN 1000, které rekonstruováno nebylo. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, toto potrubí ŽB DN 1000 pokračující k separátoru OV je stanoveno simulačním modelem jako kapacitní. Posouzení se tedy bude věnovat variantám, kdy bude sklolaminátové potrubí DN 1200 nahrazeno menšími dimenzemi, jelikož u provedených simulací bylo zjištěno, že kapacita potrubí je využita jen z přibližně 40%. Na následujícím obrázku můžeme vidět posuzovaný úsek s popisky dílčích úseků, které jsou zbarveny dle plnění. Obrázek je exportován v čase největšího zatížení celého úseku. Směr toku je zprava doleva. Dimenze celého úseku je DN 1200.



Obr. 75 Současný stav posuzovaného úseku - potrubí GRP DN 1200.

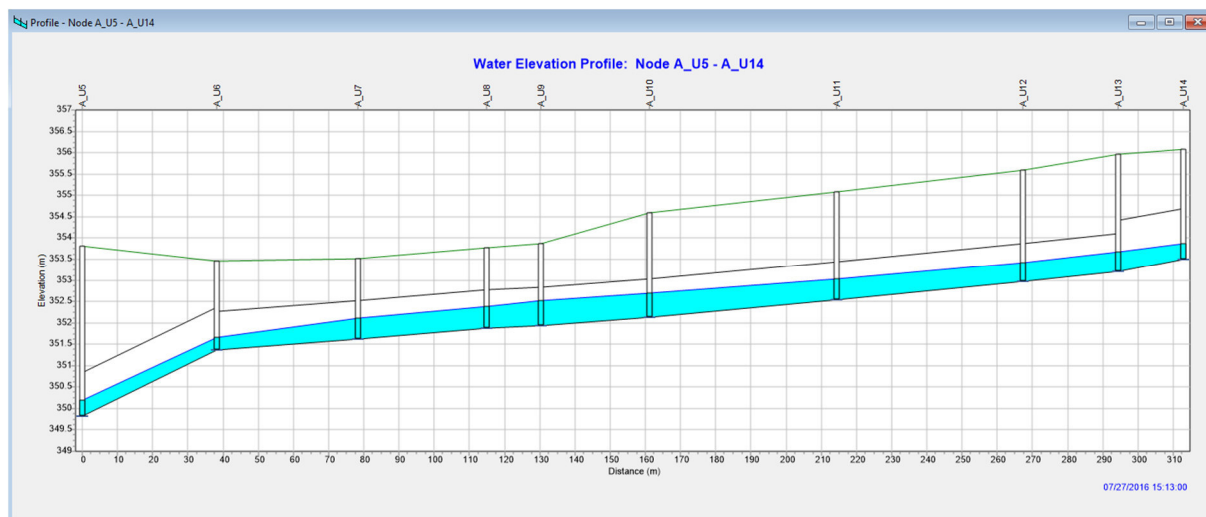
Při posuzování stokové sítě vyvolal v daném největší plnění dešť č. 1. Tento zátěžový dešť bude tedy použit i u následujících simulací variant, s měněnými dimenzemi. Jako materiál potrubí je pro všechny dimenze uvažován sklolaminát. Následující tabulka obsahuje porovnání vypočtených hodnot plnění pro dílčí úseky a dimenze. Tabulka obsahuje hodnoty plnění jak dle průtoku, tak dle výšky.

Tab. 11 Plnění posuzovaných úseků mezi uzly A\_U6 a A\_U13.

Úsek	DN 1200		DN 1000		DN 900		DN 800		DN 700	
	Plnění [%]		Plnění [%]		Plnění [%]		Plnění [%]		Plnění [%]	
	průtok	výška	průtok	výška	průtok	výška	průtok	výška	průtok	výška
A_S23	20	34	34	46	45	54	61	66	85	100
A_S24	21	35	35	46	47	55	64	68	88	100
A_S25	22	38	37	51	49	60	67	75	89	100
A_S26	26	41	43	54	57	64	78	79	103	100
A_S27	30	39	49	52	65	61	89	74	118	94
A_S28	24	36	40	48	53	56	72	67	95	84
A_S29	25	30	42	38	55	43	74	51	98	60

Z výsledků simulace vyplývá, že minimální dimenze, ve které nevyvolá zátěžový dešť ( $p=0,5$ ;  $T=20$  minut) tlakový režim proudění, je DN 800. V tomto případě se však hodnoty plnění pohybují okolo 80 %. Proto bych se vydal na stranu bezpečnou a volil použití větších dimenzí, a to DN 900 nebo DN 1000. Úsek je navíc situován v zastavěné oblasti s téměř

nulovým sklonem terénu, což by mohlo v budoucnu působit problém, pokud by současný trend zvyšování vydatností přívalových srážek pokračoval i nadále. Přihlíženo by mělo být i na dimenze okolních profilů, aby nedocházelo zbytečně k výrazným přechodům na menší profily po směru toku. Na následujících obrázcích můžeme vidět podélný profil posuzovaného úseku se znázorněnou výškou hladiny při použití potrubí GRP DN 900.



Obr. 76 Posuzovaný úsek – použito potrubí GRP DN 900.

Volba dimenzí se kromě hydraulických výpočtů odvíjí od více faktorů (např. cena, územní plán či zkušenost projektanta), v některých případech volbě předchází tvorba rizikové analýzy, na jejímž základě je pak rozhodnuto.

V závěru této kapitoly je jednoduše vyčíslen rozdíl finančních nákladů na trubní materiál, pokud by byla při rekonstrukci posuzovaného úseku použita menší dimenze potrubí. Jsem si vědom dalších položek, které se podílí na tvorbě ceny při takovýchto rekonstrukcích. Jedná se například o zemní práce (1-8) a náklady spojené s materiálem (9-11):

1. Sejmutí drnu.
2. Hloubení rýh.
3. Svislé a vodorovné přemístění výkopku.
4. Zásyp jam, obsyp potrubí.
5. Skládkovné.
6. Pažení a rozepření stěn rýh.
7. Odstranění pažení stěn rýh.
8. Dočasné zajištění potrubí a kabelů.
9. Potrubí.
10. Spojky.
11. Kanalizační šachty.

Úspora na nákladech na zemní práce při použití menší dimenze by mohlo být dosaženo v položkách 1 až 5, jelikož k pokládce trub menší dimenze by mohl mít výkop menší šířku (kubatury). To však pouze za předpokladu, že k odstraňování starého potrubí nebyla potřebná stejná či větší šířka výkopu, jako u nově pokládaných trub DN 1200.

Použitá dimenze potrubí (DN 1200) však byla volena především z důvodu bezpečnosti. Pokud by se měl projektant rozhodovat o dimenzi na základě výstupů ze simulačního modelu, náklady na rekonstrukci by narostly o výdaje nutné k tvorbě tohoto modelu. Pokud bych zde měl popsat, které položky by se podílely na tvorbě ceny modelu v našem případě, jednalo by se o:

- Měrnou kampaň
  - pronájem měřicích přístrojů (amortizace, servis);
  - instalace a demontáž měřicích přístrojů;
  - návštěvy z důvodu obsluhy (výměna baterie, kontrola měřičů) a z důvodu poruch (odesílání a sběr dat);
  - cestovní náklady;
  - vyhodnocení naměřených dat.
- Tvorba modelu
  - schůzky s provozovateli stokové sítě a starostou obce, získávání podkladů;
  - tvorba hydrotechnické situace – pochůzka v obci;
  - kompletace dat pro tvorbu modelu;
  - samotná tvorba modelu;
  - kalibrace a verifikace modelu, posouzení stokové sítě.

Dle aktuálních katalogových cen (rok 2017) by dnes činil rozdíl finančních nákladů, pokud by byla při rekonstrukci posuzovaného úseku použita menší dimenze potrubí, viz následující tabulka.

*Tab. 12 Úspora nákladů při použití menší dimenze potrubí.*

Potrubí	Úspora* [Kč]
DN 1200	0
<b>DN 1000</b>	<b>672 756</b>
<b>DN 900</b>	<b>1 019 844</b>
DN 800	1 318 674

\* Stanovena jako rozdíl nákladů při použití DN 1200 a dimenze na daném řádku. Při výpočtu nákladů bylo vycházeno z cen bez DPH, které obsahují cenu potrubí, spojky a montáž ve výkopu.

## ***Shrnutí***

Jelikož simulačním modelem nebyl stanoven žádný úsek stokové sítě jako nedostatečně kapacitní, kapitola se zabývá variantním porovnáním již zrekonstruovaného úseku stokové sítě. Z důvodu, že dle výsledků dosahuje plnění v tomto úseku hodnot do 40%, byly provedeny 4 simulace s menšími dimenzemi potrubí. Cílem bylo zjistit, jaká dimenze potrubí je kapacitně akceptovatelná a bylo by možné její použití. To však za předpokladu, že má projektant k dispozici výsledky simulačního modelu. Dále se tedy kapitola zabývá rozvahou nad náklady, které by mohly být ušetřeny při použití menší dimenze potrubí a teoreticky nad náklady spojenými s tvorbou simulačního modelu stokové sítě. Je zřejmé, že pokud se jedná o havarijní stav, který je impulsem k rekonstrukci, není možné čekat cca 4 měsíce na výstupy ze simulačního modelu, který je předtím nutné vytvořit. To však neznamená, že majitel či provozovatel infrastruktury nemůže mít model k dispozici dříve, než k takovému stavu dojde.

## 6 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá hydraulickým posouzením stokové sítě obce Lipůvka. Úkolem bylo vytvořit kalibrovaný simulační model, kterým bude stoková síť posouzena a na kterém bude možno provádět simulace různých variant rekonstrukcí kapacitně nevyhovujících úseků. Součástí práce bylo také provést měrnou kampaň v obci, jejíž výstupy byly použity ke kalibraci simulačního modelu.

První kapitola obsahuje úvod, shrnuje cíle práce a zabývá se také legislativou, která se týká řešené problematiky. Jedná se zde o komentáře obsahu norem, které se zmiňují o posuzování stokových sítí. Zde bylo zjištěno, že se normy věnují použití simulačních modelů jen okrajově. Jelikož je součástí práce i měření na stokové síti, zabývá se kapitola i legislativními požadavky spojenými s touto problematikou.

Druhá kapitola se věnuje matematickému modelování. Na úvod je zde popsána teorie týkající se modelování (definice, druhy modelů) a dále přechází k popisu modelů matematických, týkajících se proudění vody ve stokových sítích. Je zde popsáno matematické řešení proudění v uzlech a úsecích sítě, popsány počáteční a okrajové podmínky při řešení a řešitelné typy úloh. Dále se kapitola věnuje používanému softwaru (simulačním programům). Zde jsou vypsány simulační programy, které jsou k této problematice používány u nás i v zahraničí. Detailněji je popsán software SWMM, který byl v našem případě použit. V závěru se kapitola věnuje obecně kalibracím a verifikacím simulačních modelů.

Třetí kapitola popisuje prováděnou měrnou kampaň. V jejím úvodu je teoreticky popsáno k čemu slouží, co je předmětem měření či kdy a jak dlouho by měla být prováděna. Dále se věnuje popisu použité měřicí techniky, tedy srážkoměrům a průtokoměru. Popis srážkoměrů obsahuje popis funkce a principu měření, způsob sběru naměřených dat. Jelikož bylo využito offline i online dataloggerů, jsou zde popsány i výhody, které online technika přináší. Dále je zde popsán výběr místa k umístění srážkoměrů a rozhodovací kritéria. Co se týče průtokoměru, kapitola je členěna podobně jako u srážkoměrů, obsahuje popis a princip měření, výběr místa k osazení, samotnou instalaci přístroje v měrném profilu, jeho nastavení a obsluhu v průběhu monitoringu. Poslední částí této kapitoly je vyhodnocení měrné kampaně. Zde jsou shrnuty výstupy z měřicích přístrojů, na jejichž základě je rozhodnuto o kalibraci simulačního modelu na výšku hladiny. Následně jsou vybrané události popsány a doplněny o grafické výstupy z měřicích přístrojů.

Čtvrtá kapitola se věnuje simulačnímu modelu stokové sítě. V úvodu je obsažen popis zájmové lokality a stokové sítě. Dále jsou vypsány podklady pro tvorbu simulačního modelu. Následně se kapitola věnuje tvorbě samotného modelu, kdy je popsána schematizace, princip stanovení splaškového průtoku. Vytvořený model je popsán z hlediska počtu jednotlivých objektů a je uvedeno nastavení výpočtu. K této kapitole se také vážou některé z příloh. Dále se kapitola zabývá kalibrací a verifikací vytvořeného modelu. Jsou zde popsány dešťové události použité k těmto úkonům a postup práce při



provádění kalibrace. Obsaženy jsou grafy shod při kalibraci a verifikaci s vypočtenými odchylkami.

Pátá kapitola je věnována posouzení stokové sítě, což bylo hlavním cílem práce. K tomuto účelu byly určeny 3 zátěžové srážky, jejichž popis je uveden v úvodu kapitoly. Následně se zde nachází výstupy z každé zátěžové simulace, při kterých byly zjišťovány kapacitně nevyhovující úseky. Výstupy z těchto simulací jsou prezentovány v grafické podobě spolu se slovním popisem. Vypočtené hodnoty týkající se úseků stokové sítě jsou obsaženy v přílohách. Co se týče kapacity stokové sítě, z provedených simulací vyplývá, že stoková síť je dostatečně kapacitní pro všechny zátěžové srážky. Provedena byla také doplňková simulace za účelem zjištění rychlostí proudění ve stokové síti. Zde jsou vytipovány 3 úseky, které jsou dle modelu namáhány nadměrnými rychlostmi proudění, což může způsobovat degradaci materiálu. Tyto úseky mohou být doporučeny ke kamerovému průzkumu za cílem zjistit skutečný stav. Závěrem diplomové práce měl být návrh variant rekonstrukce kapacitně nevyhovujících úseků spolu s jejich ekonomickým podložením. Jelikož se však na síti takovéto úseky nevyskytují, bylo přistoupeno k simulaci variant jednoho již zrekonstruovaného úseku. Zátěžovými simulacemi byla u tohoto úseku zjištěna nízká kapacitní vytíženost. Proto byly provedeny simulace, při kterých byly v daném úseku zmenšovány profily potrubí až do kapacitně nevyhovujícího stavu. Následně jsou vypočteny rozdíly nákladů na trubní materiál mezi použitou a menšími, kapacitně vyhovujícími, dimenzemi. Na závěr je v kapitole obsaženo zamyšlení nad používáním kalibrovaných simulačních modelů k rekonstrukcím stokových sítí. A to vzhledem k možným úsporám finančních nákladů, kterých může být dosaženo při použití výstupů ze simulačních modelů jako podkladu k volbě optimální dimenze rekonstruovaných úseků.

## 7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN EN 752 Odvodňovací systémy vně budov. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [2] ČSN 75 6101 Stokové sítě a kanalizační přípojky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] STRÁNSKÝ, David. 2009. *Metodická příručka- Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí* [online]. 83 s. [cit. 2016-11-10]. Dostupné také z: [http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/17/5237-01052009\\_metodicka\\_prirucka\\_stokovy\\_system\\_090604.pdf](http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/17/5237-01052009_metodicka_prirucka_stokovy_system_090604.pdf)
- [4] SUCHÁNEK, Milan, Petr SÝKORA a David STRÁNSKÝ. *Monitoring v městském odvodnění*. Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR, 2012. ISBN 978-80-87140-25-3.
- [5] Vodní hospodářství [online]. 2013, 63(7) [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.vodnihospodarstvi.cz/ArchivPDF/vh2013/vh07-2013.pdf>
- [6] Vodní hospodářství [online]. 2010, 60(9) [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.vodnihospodarstvi.cz/ArchivPDF/vh2010/vh09-2010.pdf>
- [7] SR03 Návod k obsluze. In: Fiedler [online]. 2015 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.fiedler.company/sites/default/files/dokumenty/sr03-v1.pdf>
- [8] STARÝ, M. *Hydrologie*. BRNO: Skripta byla vydána v el. podobě, 2005.
- [9] ČSN EN 60529 Stupně ochrany krytem (krytí - IP kód). Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [10] *Hydrologické podklady pro potřeby městského odvodnění: sborník přednášek : Vysoké učení technické v Brně, červen 2010*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010, 88 s. ISBN 978-80-214-4096-8.
- [11] KREJČÍ, Vladimír. 2002. *Odvodnění urbanizovaných území - koncepční přístup*. Vyd. 1. Brno: Noel 2000, 562 s. ISBN 80-860-2039-8.
- [12] Modeling & Simulation. 2004. *Systems Thinking* [online]. [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.systems-thinking.org/modsim/modsim.htm>
- [13] ŘÍHA, Jaromír. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0827-8.
- [14] HLAVÍNEK, Petr. *Stokování a čištění odpadních vod*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 253 s.
- [15] NOVÁK, Josef. *Příručka provozovatele stokové sítě*. Vyd. 1. Líbeznice u Prahy: SOVAK ČR, 2003, 156 s. ISBN 80-238-9947-3.
- [16] ĎAŘO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 807300156X.
- [17] Průtokoměr SIGMA 950 AV: Návod k obsluze a údržbě. Polička: Aquateam.
- [18] Sigma 950 flow meter. *Hach flow* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.hachflow.com/flow-meters/sigma950.cfm>
- [19] Dopplerův jev a rázová vlna. *Fyzweb.cz* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: [http://fyzweb.cz/materialy/aplety\\_hwang/Doppler/](http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/Doppler/)

- [20] *Obec Lipůvka: Oficiální internetové stránky* [online]. 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.lipuvka.eu/>
- [21] *Mapy.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz>
- [22] Plán oblasti povodí Dyje. *Povodí Moravy* [online]. 2009 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/pop/2009/Dyje/end/a-popis/a-1.html>
- [23] Geologická mapa. *Česká geologická služba* [online]. 2014 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [http://mapy.geology.cz/geocr\\_50/](http://mapy.geology.cz/geocr_50/)
- [24] *Provozní řád kanalizace Lipůvka: Provozní řád pro trvalý provoz*. 2012 [cit. 2016-12-14].
- [25] *LIPŮVKA – ODKANALIZOVÁNÍ VÝUSTÍ, VÝUSTĚ JIHOVÝCHOD, Dokumentace skutečného provedení stavby (DSPS): A. PRŮVODNÍ ZPRÁVA*. Brno, 2015.
- [26] *LIPŮVKA – HAVÁRIE KANALIZACE, STOKA B2, Dokumentace pro provádění stavby (DPS): I. TECHNICKÁ ZPRÁVA*. Brno, 2016.
- [27] ROSSMAN, Lewis. U.S. EPA. *STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER'S MANUAL* [online]. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, Water Quality Office, 2010, 285 s. [cit. 2016-12-15]. Dostupné také z: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100ERK4.pdf>
- [28] Jan Balas *Posouzení vybrané části kanalizace v obci*. Brno, 2015. 60 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Petr Hlušík, Ph.D.
- [29] Úvod do datalogerů, záznam dat. JAKAR Electronics [online]. 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.jakar.cz/uvod-do-datalogeru-zaznam-dat>
- [30] TRUPL, Josef. *Intensita krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský, 1958, 76 p.

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Doporučené odchylky při kalibraci a verifikaci. [11] .....	24
Tab. 2	Zdroj, významnost a směr systematických chyb člunkových srážkoměrů. [4].....	33
Tab. 3	Metody měření průtoků. [11] .....	37
Tab. 4	Rozdělení délek stokové sítě dle materiálu. (zdroj: Obec Lipůvka) .....	75
Tab. 5	Rozdělení délek stokové sítě dle dimenzí. (zdroj: Obec Lipůvka).....	76
Tab. 6	Použité hodnoty Manningova součinitele drsnosti n před kalibrací.....	80
Tab. 7	Typy a počty objektů obsažené ve vytvořeném simulačním modelu.....	84
Tab. 8	Doporučené četnosti výskytu a periodicity zátěžových dešťů. [2].....	89
Tab. 9	Náhradní intenzity dešťů. [30] .....	89
Tab. 10	Zátěžové srážky. ....	90
Tab. 11	Plnění posuzovaných úseků mezi uzly A_U6 a A_U13.....	100
Tab. 12	Úspora nákladů při použití menší dimenze potrubí.....	102

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Simulační srážko-odtokové modely. [3] .....	19
Obr. 2	Použitý překlopný člunkový srážkoměr. ....	27
Obr. 3	Datalogger Newlog 3.24B. ....	28
Obr. 4	Datalogger-okno připojení. ....	29
Obr. 5	Online dataloggery .....	30
Obr. 6	Webové rozhraní pro správu online loggerů. ....	31
Obr. 7	Umístění srážkoměru 01 Starosta. ....	34
Obr. 8	Umístění srážkoměru 02 Eko-Dvůr. ....	35
Obr. 9	Průtokoměr Sigma 950 .....	38
Obr. 10	Šachta Š3. ....	41
Obr. 11	Spojná komora SP1. ....	42
Obr. 12	Přípevnění kabelu sondy průtokoměru. ....	44
Obr. 13	Přípevněný plát se sondou v potrubí. ....	44
Obr. 14	Kontrola nastavení průtokoměru při osazování. ....	45
Obr. 15	Zavěšená jednotka průtokoměru. ....	46
Obr. 16	Stahování dat průtokoměru. ....	46
Obr. 17	Průtokoměr – okno připojení. ....	47
Obr. 18	Prostředí programu Insight. ....	48
Obr. 19	Naměřené dešťové úhrny za dobu měrné kampaně. ....	50
Obr. 20	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 13. - 14.7. ....	51
Obr. 21	Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 13. - 14.7. ....	51
Obr. 22	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 13. - 14.7. ....	52
Obr. 23	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 21.7. ....	52
Obr. 24	Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 21.7. ....	53
Obr. 25	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 21.7. ....	53
Obr. 26	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 27.7. A. ....	54
Obr. 27	Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 27.7. A. ....	54
Obr. 28	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 27.7. A. ....	55
Obr. 29	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 27.7. B. ....	55
Obr. 30	Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 27.7. B. ....	56
Obr. 31	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 27.7. B. ....	56
Obr. 32	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 29.7. ....	57
Obr. 33	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 31.7. A. ....	58
Obr. 34	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 31.7. B. ....	58
Obr. 35	Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 31.7. B. ....	59
Obr. 36	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 31.7. B. ....	59
Obr. 37	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 21.8. ....	60

Obr. 38	Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 21.8. ....	60
Obr. 39	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 21.8. ....	61
Obr. 40	Záznam srážkoměru 01 Starosta – událost 5.9. ....	61
Obr. 41	Záznam srážkoměru 02 Eko dvůr – událost 5.9. ....	62
Obr. 42	Porovnání záznamů srážkoměrů – událost 5.9. ....	62
Obr. 43	Průběh výšky hladiny a rychlosti proudění při události dne 29.7. ....	64
Obr. 44	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /1.....	65
Obr. 45	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /2.....	66
Obr. 46	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /3.....	66
Obr. 47	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 13. – 14.7. /1.....	67
Obr. 48	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 27.7.....	68
Obr. 49	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 29.7.....	68
Obr. 50	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 31.7. A.....	69
Obr. 51	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 31.7. B.....	69
Obr. 52	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 21.8.....	70
Obr. 53	Průběh výšky hladiny v měrném profilu – událost 5.9.....	71
Obr. 54	Lokalizace obce Lipůvka. [21] .....	72
Obr. 55	Letecký snímek obce Lipůvka. [21] .....	73
Obr. 56	Výstavba řadu ŽB DN 600, rok 2015.....	74
Obr. 57	Rekonstrukce stoky B2, rok 2016.....	75
Obr. 58	Rozdělení délek stokové sítě dle materiálu. (zdroj: Obec Lipůvka).....	76
Obr. 59	Rozdělení délek stokové sítě dle dimenzí. (zdroj: Obec Lipůvka).....	77
Obr. 60	Objekt se separátorem odpadních vod.....	78
Obr. 61	Separátor odpadních vod. ....	78
Obr. 62	Objekt separátoru odpadních vod nadefinovaný v SWMM. ....	83
Obr. 63	Postup při kalibraci. ....	85
Obr. 64	Kalibrace simulačního modelu. ....	86
Obr. 65	Verifikace simulačního modelu, událost 27.7. ....	87
Obr. 66	Verifikace simulačního modelu, událost 31.7. B.....	88
Obr. 67	Syntetický Šifaldův déšť. [14].....	90
Obr. 68	Vyhodnocení kapacity – déšť č. 1, pohled na celou síť.....	92
Obr. 69	Vyhodnocení kapacity – déšť č. 1, podélný profil nad separátorem. ....	93
Obr. 70	Vyhodnocení kapacity – déšť č. 2, pohled na celou síť.....	94
Obr. 71	Vyhodnocení kapacity – déšť č. 2, podélný profil nad separátorem. ....	95
Obr. 72	Vyhodnocení kapacity – déšť č. 3, pohled na celou síť.....	96
Obr. 73	Vyhodnocení kapacity – déšť č. 3, podélný profil nad separátorem. ....	97
Obr. 74	Vyhodnocení rychlostí – pohled na celou síť.....	98
Obr. 75	Současný stav posuzovaného úseku - potrubí GRP DN 1200.....	100
Obr. 76	Posuzovaný úsek – použito potrubí GRP DN 900. ....	101

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	...	plocha
f	...	funkce
v	...	rychlost proudění
Q	...	průtok
x	...	poloha
y	...	hloubka
h	...	výška hladiny
i	...	intenzita
t	...	čas
p	...	periodicita
T	...	doba trvání deště
$\partial$	...	parciální derivace
$\beta$	...	Boussinesqův součinitel rychlosti
DYNV	...	dynamická vlna
DIFV	...	difuzní vlna
KV	...	kinematická vlna
PM	...	Program manager
Vss	...	stejnoseměrný proud
Vst	...	střídavý proud
ÚNMZ	...	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
SWMM	...	Storm water management model
U.S. EPA	...	United States environmental protection agency
MOUSE	...	Model for urban sewer
DHI	...	Dánský hydrologický institut
GIS	...	geografický informační systém
CAD	...	Computer Aided Design
ČR	...	Česká Republika
ČOV	...	čistírna odpadních vod
DN	...	jmenovitá světlost
BE	...	beton
ŽB	...	železobeton
PVC	...	polyvinylchlorid
PP	...	polypropylen
PE	...	polyethylen
GRP	...	glass reinforced plastic (sklolaminát)
Q <sub>5</sub>	...	pětiletý průtok
Q <sub>20</sub>	...	dvacetiletý průtok
Q <sub>100</sub>	...	stoletý průtok
VUT	...	Vysoké učení technické
FAST	...	Fakulta stavební
ÚVHO	...	Ústav vodního hospodářství obcí



VST	...	Ústav vodních staveb
VAS	...	Vodárenská akciová společnost
a.s.	...	akciová společnost
s.r.o.	...	společnost s ručením omezeným
PD	...	projektová dokumentace
Š	...	šachta
U	...	uzel
DMT	...	digitální model terénu
JTSK	...	jednotná trigonometrická síť katastrální
PC	...	personal computer
GSM	...	Groupe Spécial Mobile
GPRS	...	General Packet Radio Service
ČHMÚ	...	Český hydrometeorologický ústav
SELČ	...	středoevropský letní čas
1D	...	jedno dimenzionální
3D	...	tří dimenzionální
$y_{\text{mer}}$	...	naměřená hodnota
$y_{\text{sim}}$	...	vypočtená hodnota
$r_r$	...	relativní odchylka
$r_p$	...	průměrná odchylka
p.č.	...	parcelní číslo
d	...	den
m n. m.	...	metrů nad mořem
s	...	sekunda
hod	...	hodina
min	...	minuta
mm	...	milimetr
m	...	metr
km	...	kilometr
ha	...	hektar
$\text{m}^3$	...	metr krychlový
l	...	litr
mg	...	miligram
$\psi$	...	součinitel odtoku
$n$	...	Manningův součinitel drsnosti
ČSN	...	Česká státní norma
aj.	...	a jiné
dxf, dwg	...	formát výkresu
txt, inp	...	textový soubor
xls	...	přípona souboru vytvořeném v Microsoft Excel
Obr.	...	obrázek
Tab.	...	tabulka

## SEZNAM PŘÍLOH

01	Vytvořený model stokové sítě	M 1:2000
02	Rozdělení splaškových oblastí	M 1:4000
03	Přehledné schéma zájmové oblasti	M 1:4000
04	Charakteristiky úseků	
05	Výšky uzlů	
06	Vypočtené hodnoty v úsecích při zatížení deštěm č. 1	
07	Vypočtené hodnoty v úsecích při zatížení deštěm č. 2	
08	Vypočtené hodnoty v úsecích při zatížení deštěm č. 3	

## SUMMARY

The diploma thesis is focused on hydraulic assessment of sewer system. The challenge was to create a calibrated simulation model of sewer system in the village Lipůvka and make hydraulic capacity assessment of its sewer system. The first chapter is devoted to legislative rules in this problematics valid in the Czech Republic and the European Union. The second chapter is focused on mathematical modeling. Furthermore, there are explained basic concepts and partition of models. The chapter focuses on the description of selected, especially commercial software products dealing with the hydrodynamic simulation models. The third chapter aims to describe monitoring campaign, which was done as a part of the work. The chapter contains description of used measurement devices (flowmeter and two rain-gauges) and choosing its location in village. In the end of this chapter, there is a review of monitoring with some results. The fourth chapter is devoted to the dynamic rainfall-runoff simulation model of Lipůvka's sewer system. The whole sewer system in the village is described in the first part. Next part deals with sources, which had to be acquired to build the model, schematization (simplifying) and making the model. This chapter deals with calibration and verification this model too. The last part is devoted to hydraulic assessment of the sewer system. There are described three load states. Simulation results of each load state are attached in three forms. Model did not show any problem with capacity on the sewer system. In the end of this chapter, there is assessment of one, hydraulic low loaded, part of the sewer system. This part of the sewer has been reconstructed few years ago. The assessment is done for four smaller pipe's diameters and difference in financial expenses is determined.